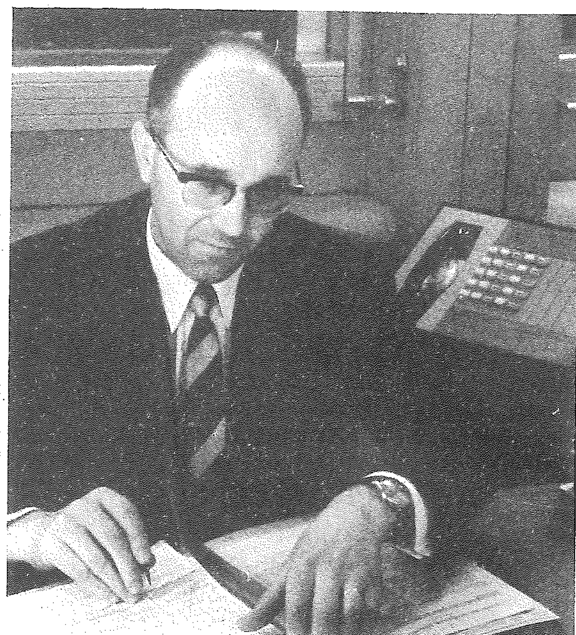

Michel PHILIPPOT


Iannis XENAKIS

Pierre BARBAUD



Sur la page de droite : Nicole LACHARTRE

LES MUSIQUES ARTIFICIELLES

par NICOLE LACHARTRE
qui
dédie
son étude
à
Pierre Barbaud, Wilhelm Fucks, Lejaren Hiller, Gottfried Michael Kœnig, Max V. Mathews, Michel Philippot et Iannis Xenakis, dont les travaux lui ont fait découvrir de nouvelles façons de pénétrer dans le monde des sons.



DIAGRAMMES DU MONDE : Publication mensuelle / Directeur responsable : J. Plumenail / Directeur scientifique : Albert Ducrocq / Secrétaire de rédaction : Aline Bats / Éditions du CAP Palais de la Scala, Monte-Carlo. C.C.P. 1533-25, Marseille / Abonnements 12 numéros France : 40 F. Belgique : 500 Frs B. Suisse : 46 Frs S. Autres pays étrangers, équivalents $: 10,50. 24 numéros France : 69 F. Belgique : 870 Frs B. Suisse : 80 Frs S. Autres pays étrangers, équivalent $ 18,50. / Changements d'adresse : Envoyer la dernière bande avec la somme de 0,50 F ou l'équivalent en monnaie étrangère.

AVRIL 1969

SOMMAIRE

LES MUSIQUES ARTIFICIELLES

Préface 5
Chapitre I : Un peu d'histoire de la musique 6
Chapitre II : Hiller, Père de la musique par ordinateur 10
Chapitre III : Pierre Barbaud et la musique algorithmique 19
Chapitre IV : Iannis Xenakis et la musique stochastique 29
Chapitre V : Les sons synthétiques 41
Chapitre VI : Michel Philippot et la machine imaginaire 51
Chapitre VII : Gottfried Michael Koenig 56
Chapitre VIII : Wilhelm Fucks et l'analyse statistique de la musique 60
Chapitre IX : Abraham Moles et la théorie de l'Information 64
Chapitre X : Travaux divers 66
Chapitre XI : Nicole Lachartre : Essai I et Essai II, deux expériences de composition musicale automatique 68
Chapitre : XII : Interrogations 72
Chapitre XIII : Carrefour d'idées 77
Pour en savoir davantage 83

Études et Documents

Les opérations planétaires par Alain Dupas 85

Sciences, Monde et Techniques

L'atome et la vie 95
Bio-actualités 95
Techniques nouvelles 95

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier très vivement, pour l'aide qu'ils nous ont apportée dans nos travaux en nous communiquant très obligeamment tous les renseignements et la documentation dont nous avions besoin, MM. P. Barbaud, A. Ducrocq, W. Fucks, L.A. Hiller, G.M. Kœnig, M. Philippot, I. Xenakis, MM. N. Guttman, M.V. Mathews, J.R. Pierce, J.C. Risset et L. Rosler de la Bell Telephone of New-Jersey, MM. H. Chiarucci et P. Janin du Groupe de Recherches Musicales (Service de la Recherche de l'ORTF, direction Pierre Schaeffer), M. Genuys qui nous a permis d'étudier les installations d'IBM, et la direction de la Bull-General Electric où nous avons pu réaliser notre expérience personnelle.

PRÉFACE

Aujourd'hui comme hier, on écrit beaucoup sur la musique. Certes beaucoup trop lorsqu'il s'agit de commenter, mais en revanche jamais assez lorsqu'il s'agit d'informer! Le principal mérite du travail de Nicole Lachartre est d'offrir une somme appréciable de renseignements sur un sujet qui, pour être de la plus brûlante actualité, pour avoir déclenché les plus vives polémiques, n'était guère illustré jusqu'ici que par des ouvrages théoriques difficilement lisibles et par quelques articles d'encyclopédie ou de revue forcément limités. C'est, à n'en pas douter, le premier texte d'importance à faire le point. La première étude de synthèse à analyser successivement les méthodes et à établir objectivement l'apport des différents chercheurs, groupes et studios qui se consacrent aujourd'hui, de par le monde, à l'application des sciences mathématiques et à l'emploi des ordinateurs dans la composition musicale.

Documentée, sérieuse et impartiale, cette enquête est menée sans *passions* — au pluriel — mais non sans *passion* — au singulier. Je veux dire que Nicole Lachartre s'est très évidemment passionnée pour son sujet et que je lis en filigrane son propre itinéraire dans un domaine dont elle me fait partager la découverte. Elle écrit en musicienne que l'aventure sollicite. Il n'est donc pas étonnant de la voir rapporter ses expériences personnelles de compositrice, aboutissement naturel et professionnel de son étude. Devant les problèmes esthétiques, sociologiques, voire philosophiques, posés par cette nouvelle manière de faire de la musique, devant les perspectives immenses et inquiétantes qu'elle ouvre pour un avenir tout proche, il ne convenait pas de jouer les prophètes à bon compte, mais bien mieux d'exposer les données et de formuler les questions, tout en faisant entendre quelques opinions dissonantes. C'est ce que l'auteur a fait sans se départir de son calme et de sa modestie.

Une fois renseigné sur l'état actuel de cette recherche, l'une des plus fascinantes de notre temps, une fois informé des techniques comme des ambitions, il restera au lecteur de bonne volonté à écouter les musiques nées de l'imagination, de la spéculation, de l'ingéniosité humaines et du concours docile de la machine. Toute musique n'est-elle pas faite, d'abord et avant tout, pour être entendue! Mais il y faudra — hélas! — beaucoup de patience : les concerts spécialisés sont rares et les disques peu nombreux. Ici comme ailleurs, les systèmes de diffusion ont pris un retard grave sur la création vivante.

Ce n'est qu'à l'écoute directe, avec le moins possible de préalables intellectuels, que les œuvres *calculées,* comme la plupart des autres d'ailleurs, peuvent atteindre leur dimension définitive et trouver leur fonction véritable. Hors cela, il n'est point de message. Car, toutes *artificielles* que soient leurs méthodes de fabrication, et même quelquefois leur conception profonde, les nouvelles musiques sorties de l'ordinateur n'en véhiculent pas moins une pensée. Une pensée d'homme qui sera toujours *naturelle* à l'homme.

Maurice Fleuret

CHAPITRE I
UN PEU D'HISTOIRE DE LA MUSIQUE

« Plus il ira, plus l'art sera scientifique, de même que la science deviendra artistique. Tous deux se rejoindront au sommet après s'être séparés à la base. Aucune pensée humaine ne peut prévoir à quels éblouissants soleils psychiques écloreront les œuvres de l'avenir. »

Croisset, 24 avril 1852,
Gustave FLAUBERT.

L'emploi d'un ordinateur dans la composition musicale n'est pas un événement fortuit, accidentel. Il s'inscrit normalement dans le cadre de l'évolution générale de la pensée musicale occidentale, évolution dont il est nécessaire de dégager succinctement les grandes lignes, car toute transformation de la conception, toute nouveauté technique en musique ne se comprennent bien que si l'on connaît ce qui les a précédées.

Du chant grégorien aux musiques par ordinateur

L'évolution de la musique en Occident se caractérise par un certain nombre de phases enchaînées les unes aux autres par des périodes de mutation. Il n'y a pas rupture, mais plutôt transformation de ce qui existait en quelque chose de différent. Quelles sont ces mutations et comment se sont-elles effectuées ?

Si l'on remonte jusqu'à la période du chant grégorien, monodique (c'est-à-dire à une seule voix), et utilisant les huit modes issus de la musique grecque, la première mutation à observer est la naissance de la polyphonie (emploi de plusieurs voix simultanées) au début du XIIe siècle. La polyphonie utilise les matériaux du chant grégorien : à la ligne mélodique principale s'ajoute d'abord une seconde voix, puis plusieurs; ces voix, à l'origine étroitement subordonnées à la voix principale, deviennent ensuite de plus en plus indépendantes. Du XIVe à la fin du XVIe siècle, c'est le règne du contrepoint, de l'art vocal polyphonique que Lassus et surtout Palestrina portent à leur plus haut degré de perfection.

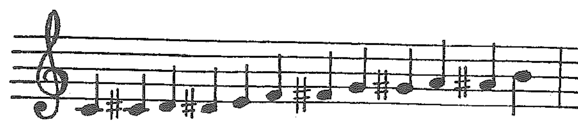


Fig. 1. — *Gamme chromatique.*

De nouvelles mutations, qui mettront fin à cette phase, se préparent. Dans le dernier tiers du XVIe siècle, des poètes, des philosophes et des musiciens, réunis en cénacle à Florence, veulent lutter contre la polyphonie et retrouver la déclamation lyrique de l'Antiquité; c'est, via le madrigal, la naissance de l'opéra, sous la forme d'un chant monodique avec accompagnement de quelques instruments. Monteverdi donne à cette forme nouvelle ses premiers chefs-d'œuvre. La musique instrumentale se développe alors, deux grandes formes s'imposent, la suite et la sonate, vouées à un avenir important et basées sur le principe du contraste.

Une autre révolution est l'adoption du tempérament, nouveau système pour accorder les instruments, qui divise l'intervalle d'octave en douze intervalles égaux, les douze demi-tons de la gamme chromatique (Fig. 1.). C'est le point de départ d'une nouvelle mutation : la musique quitte l'univers modal et polyphonique pour s'acheminer vers l'harmonie et sa conséquence directe, la tonalité. J.-S. Bach fixe ce nouveau système, basé sur deux modes, le mode majeur, issu du mode hypolydien, et le mode mineur, déformation du mode hypodorien (Fig. 2.).

La phase tonale de la musique occidentale se prolonge jusqu'à l'aube du XXe siècle, et voit la naissance et le développement de nouvelles grandes formes musicales issues de la forme sonate : le concerto, la symphonie, illustrés d'abord par Haydn, Mozart, Beethoven.

Au XIXe siècle, l'expression prend peu à peu le pas sur la forme; les compositeurs veulent traduire en musique leurs sentiments, leurs émotions, leurs sensations. C'est le Romantisme. Le concerto, la symphonie, l'opéra, la sonate, prennent des dimensions de plus en plus importantes et une complexité croissante. Le système tonal est resté en perpétuelle évolution depuis sa formation; l'emploi généralisé du chromatisme, à des fins expressives, et l'extension des ressources sonores (effectif orchestral de Wagner et de Mahler) conduisent à la détérioration progressive de la tonalité.

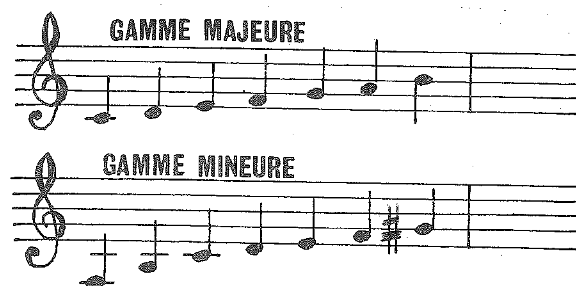


Fig. 2. — *Modes majeur et mineur.*

Au début du XXe siècle, un besoin de réaction contre les excès du romantisme se fait jour. Les possibilités de la tonalité paraissent épuisées. La musique arrive à une nouvelle période de mutation.

Certains compositeurs écrivent très librement une musique « atonale », sans élaborer vraiment un nouveau système, tels Debussy dans ses dernières œuvres, Strawinsky dans ses premières œuvres, et Bartok.

C'est de la gamme chromatique que va naître un nouveau système. Le compositeur autrichien Schoenberg pose les principes de la musique dodécaphonique (appelée plus tard sérielle), basée sur l'emploi des douze sons de la gamme chromatique présentés dans un certain ordre, choisi par le compositeur, et formant ainsi une succession appelée série, dans laquelle chaque son a une importance égale et ne doit pas réapparaître avant que les onze autres aient été entendus.

Les intervalles de la série ainsi constituée peuvent se renverser, formant une seconde série issue de la première; l'une et l'autre peuvent se lire à l'envers. (Fig. 3.) Il y a donc quatre présentations différentes qui, transposées sur chacun des douze sons de la gamme chromatique, permettent d'obtenir quarante-huit présentations de la série initiale. Chaque œuvre possède ainsi son mode particulier, la série, qui lui sert aussi de thème.

Webern continue dans la lignée de Schoenberg, et perfectionne le système dodécaphonique. Plus près de nous, Boulez, à la suite de Messiaen, généralise le principe de la série, jusqu'alors réservé aux hauteurs, en l'appliquant aux autres paramètres du son : les durées, les intensités et les timbres. « Que notre imagination aiguise notre intelligence, et que notre intelligence assure notre imagination » écrit Pierre Boulez dans son livre *Penser la musique aujourd'hui*[1], après avoir exposé l'éventail élargi, diversifié et complexe des possibilités offertes par le système sériel.

La notion de choix à effectuer parmi des possibilités diverses prend alors une grande importance, par réaction contre le contrôle excessif du matériau sonore et sa fabrication synthétique au studio de Cologne (Karleinz Stockhausen). Certains compositeurs veulent laisser la liberté d'un choix à leurs interprètes et organisent dans leurs partitions différents circuits, l'interprète décidant lui-même d'exécuter tel ou tel des fragments proposés. Cela aboutit à la forme ouverte, qui offre pour une même œuvre plusieurs possibilités d'exécution, et peut laisser à la décision du chef d'orchestre ou de l'interprète la détermination de certains paramètres musicaux et celle de certains parcours. De nombreux compositeurs, à la suite de John Cage, pratiquent actuellement cette méthode, où l'on peut discerner deux courants différents : certains compositeurs prévoient et organisent à l'avance toutes les combinaisons sonores possibles, d'autres n'en fixent qu'une partie et confient, par des méthodes variées, une part plus ou moins importante du devenir de l'œuvre au hasard.

Le choix, fait par le compositeur à son gré, ou préorganisé et laissé à l'interprète, peut donc aussi être aléatoire. Iannis Xenakis, pour certaines de ses œuvres, puise dans la totalité des possibles musicaux selon les lois du hasard, avec un minimum de règles de composition. Or, l'application rigoureuse des lois du hasard demande des calculs nombreux et complexes qu'un ordinateur, convenablement dirigé par un programme approprié, effectue beaucoup plus rapidement que l'homme ne pourrait le faire. En même temps que l'emploi du hasard s'implante dans la composition musicale, des expériences de composition par ordinateur sont menées aux USA par Hiller, en France par Barbaud et Xenakis.

1. Éditions Gonthier. Bibliothèque Médiations, 36, rue des Plantes, Paris.



Fig. 3. — *Les quatre présentations d'une série.*

De l'arc musical au synthétiseur de sons

Parallèlement à l'évolution de la conception abstraite de la musique, et en liaison étroite avec elle, s'est toujours développée une évolution des moyens pratiques de produire le son; l'apparition des nouvelles techniques de production du son peut provoquer une transformation du processus de composition.

Depuis l'arc musical de la préhistoire jusqu'à l'onde Martenot et jusqu'aux structures Lasry-Bachet, l'homme a constamment perfectionné et diversifié les instruments qui lui servent à « faire de la musique », c'est-à-dire à produire les sons. La lutherie occidentale traditionnelle, jusqu'au xxe siècle, a été conçue en fonction du système musical régnant, celui de la tonalité. Outre les claviers, orgue, piano, clavecin, ce sont les cuivres (cors, trompettes, trombones, etc...), les bois, (flûtes, hautbois, clarinettes, bassons) et les cordes (violon, alto, violoncelle, contrebasse), qui composent l'orchestre classique. Un quatrième groupe, celui des percussions, y est pauvrement représenté par les timbales (accordées à des hauteurs déterminées), les cymbales et la grosse caisse (de hauteurs indéterminées).

Au début du xxe siècle, en même temps que s'amorce l'abandon du système tonal, le groupe des percussions s'augmente d'un grand nombre d'instruments empruntés aux musiques extra-européennes (tam-tam, tom-tom, gong, etc...), qui, en entrant dans la composition des orchestres élargissent l'éventail des sons considérés comme musicaux.

L'apparition des moyens mécaniques de reproduction du son, radio, disque, puis magnétophone, change les conditions d'écoute de la musique; l'audition d'une œuvre n'est plus liée à la présence d'un interprète et de son instrument. Le magnétophone permet d'enregistrer, de reproduire et d'écouter à volonté tous les sons; cette possibilité, ainsi que celles de transposer vers l'aigu ou vers le grave, de mêler les sons les plus variés grâce à la bande magnétique, fait éclater la conception traditionnelle du son musical : ce n'est plus seulement le son produit par un instrument de musique; tous les bruits de la ville ou de la nature, enregistrés et travaillés, transposés, filtrés, mêlés, deviennent des matériaux sonores disponibles pour le compositeur. C'est encore une mutation, provoquée, celle-là, par les nouveaux moyens techniques, c'est la naissance de la musique dite expérimentale, dont Pierre Schaeffer et Pierre Henry sont les initiateurs. Par la suite, on emploie aussi des générateurs d'ondes comme sources de sons. Des studios de musique électronique (ou expérimentale) voient le jour dans de nombreux pays.

Le compositeur qui désire s'initier aux techniques nouvelles doit avoir un minimum de connaissances de physique et d'acoustique. C'est particulièrement vrai pour l'emploi du tout dernier moyen de production des sons : l'ordinateur qui, par une conversion numérale-analogique, permet de synthétiser toutes sortes de sons.

A condition de lui fournir avec un minimum de précision les données des composantes physiques du son, le synthétiseur peut soit reproduire des timbres déjà existants, comme ceux d'instruments de musique traditionnels, soit produire des sons nouveaux.

Cette technique récente et encore peu exploitée offre certainement de riches possibilités d'avenir. Comme celle de la musique expérimentale, elle déplace l'acte du compositeur : dans la musique traditionnelle, celui-ci créé son œuvre sur le papier, il en prévoit tous les aspects d'une façon purement abstraite, et c'est l'interprète qui transforme en sons les signes conventionnels de la partition. Dans le cas de la musique électronique comme dans celui des études réalisées au synthétiseur de sons, le compositeur (mais ne faudrait-il pas plutôt l'appeler « technicien du son »?) produit lui-même les sons dont il compose son œuvre. L'acte de création porte donc autant sur le matériau sonore que sur son organisation.

Des neumes à la notation musicale sous forme de fonctions

L'évolution de la notation musicale est à l'origine en étroite corrélation avec la conception abstraite de la musique.

Au temps du chant grégorien monodique, des signes appelés neumes indiquaient les inflexions ascendantes ou descendantes de la voix. On ajouta une première ligne, qui indiquait une hauteur fixe, le FA, puis une seconde ligne correspondant à l'ut (appelé DO ultérieurement), et ainsi se forma petit à petit la portée de cinq lignes. Les clefs, placées au début de chaque portée pour déterminer la hauteur exacte des sons, étaient à l'origine des lettres de l'alphabet désignant les notes.

Pour la fixation des durées, une notation proportionnelle se développe à partir du xiie siècle.

La notation musicale employée pendant la phase du système tonal, de Bach à Wagner, évolue peu. En voici les principes de base :

Sept clefs sont utilisées, quatre clefs d'ut, deux lefs de fa et une clef de sol. Les plus usitées sont es clefs de sol seconde (la seconde ligne de la ortée est un sol), et fa quatrième (la quatrième igne de la portée est un fa). Le dièse ♯ hausse la ote qu'il précède d'un demi-ton, le bémol ♭ 'abaisse d'un demi-ton (Fig. 4).

Pour la notation des durées, on emploie une inité de durée, la ronde, et ses subdivisions (Fig. 5). Jn point adjoint à une note lui ajoute la moitié le sa durée normale.

Un morceau de musique est divisé en mesures éparées par des barres; la valeur de la mesure est ixée par deux chiffres, par exemple 2/4; le chiffre upérieur indique le nombre de temps dans une nesure, et le chiffre inférieur la valeur d'un temps n fraction de l'unité, la ronde. Dans l'exemple lonné, une mesure contient deux temps, valant hacun le quart d'une ronde, c'est-à-dire une noire.

Les nuances vont du quadruple piano noté PPPP u quadruple forte FFFF.

Cette notation est encore utilisée par les premiers compositeurs dodécaphoniques, ainsi que par ceux qui écrivent une musique dite atonale. Les rythmes ont d'une complexité croissante, mais les hauteurs, emprisonnées dans l'univers du tempérament, ne hangent pas.

Il faut attendre le courant du xxe siècle pour observer certains changements. L'emploi des quarts le tons est beaucoup plus fréquent; de nombreux signes conventionnels apparaissent, indiquant les nouvelles techniques de jeu des instruments; la prolifération de ces signes n'est pas sans poser quelques problèmes, car il n'y a pas de codification générale, et souvent la notation d'un même effet est différente selon les compositeurs. La mesure, elle qu'elle a été décrite précédemment, est fréquemment remplacée par des battues mesurées en secondes, à l'intérieur desquelles les instrumentistes placent, parfois très librement, les notes qui eur sont dévolues, ceci correspondant au besoin le laisser une marge de liberté aux exécutants à l'intérieur d'un cadre donné.

Mais ce ne sont là que des modifications, et la notation traditionnelle, même ainsi assouplie, est inadéquate dès qu'on aborde le domaine des bruits, et ne peut pas convenir aux besoins de la musique électronique, ni à ceux de la synthèse des sons. Aussi s'oriente-t-on vers une nouvelle forme de

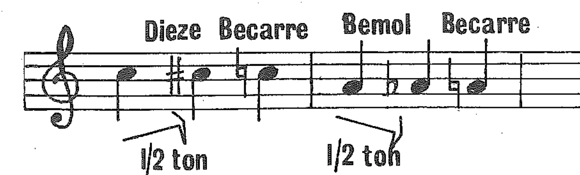


Fig. 4. — *Dièse, bémol et bécarre.*

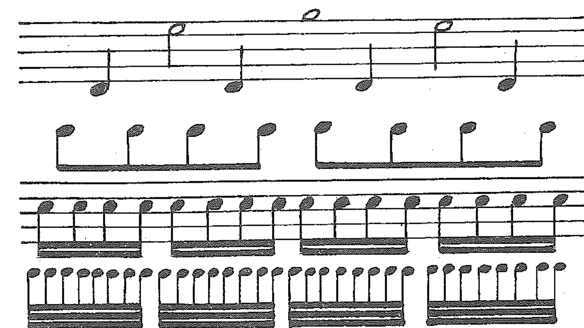


Fig. 5. — *Notation des durées.*

partition, la partition graphique où les paramètres physiques du son, fréquences en hertz, durées en secondes, intensités en décibels, sont spécifiés sous forme de fonctions.

Ce genre de partition paraît bien adapté aux nécessités de la synthèse des sons, comme on le verra dans le chapitre consacré aux travaux effectués dans ce sens à la Bell Telephone.

Dans les cas où l'ordinateur est utilisé pour mettre en œuvre des algorithmes, pour appliquer des lois du hasard, comme dans les œuvres de Barbaud et de Xenakis, la sortie numérique fournie par la machine est une nouvelle forme de partition; actuellement, seul le compositeur sait lire cette sortie, et il doit la transcrire dans la notation traditionnelle. Il existe aussi des sorties d'ordinateur sous la forme d'une partition en notation traditionnelle simplifiée.

Enfin pour la musique expérimentale telle qu'elle se pratique dans les studios d'électronique, le problème de la notation n'est pas résolu, et il n'existe pas de véritable partition complète et précise, le compositeur employant fréquemment des schémas à un usage personnel pendant le travail de composition, et l'œuvre ayant sur la bande magnétique sa réalisation définitive. Cela soulève d'ailleurs certains problèmes, beaucoup d'œuvres électroniques nécessitant une interprétation à l'exécution : spatialisation, intensité variable des diverses pistes, etc..

Les premières expériences de composition musicale par ordinateur

Les quelques pages qui viennent d'être consacrées à un bref survol des différents aspects de l'évolu-

tion musicale en occident ont permis de situer dans une ligne générale l'apparition des nouvelles techniques de composition par ordinateur.

C'est aux États-Unis, en 1956, qu'a été réalisée la toute première expérience de composition par l'ordinateur Datatron, d'une mélodie nommée Push-Button Bertha, expérience faite par M. Klein et D. Bolitho.

La « Suite Illiac » pour quator à cordes de L.A. Hiller et L. Isaacson, paraît en 1957, et, en 1958, L.A. Hiller fonde le Studio de Musique Expérimentale de l'Université d'Illinois, où depuis cette date il poursuit avec ses collaborateurs recherches et expériences de composition par ordinateur.

Toujours aux États-Unis, Mathews, Pierce et Guttman commencent des expériences de synthèse artificielle des sons au moyen d'un convertisseur digital-analogique, à la Bell Telephone Company, dès 1959, et poursuivent toujours actuellement des travaux dans ce domaine.

En France, la première œuvre réalisée par ordinateur est créée en 1960 au Festival de la Recherche : c'est 7! de Pierre Barbaud, qui depuis cette époque a continué à la Bull General Electric ses recherches dans le domaine de la composition automatique.

Iannis Xenakis, qui depuis 1955 fait entrer dans la composition musicale les lois du calcul des probabilités, met au point un programme qui lui permet de réaliser, chez IBM, en 1962, une série d'œuvres calculées par ordinateur.

L.A. Hiller, Mathews et ses collaborateurs, Pierre Barbaud et Iannis Xenakis sont les pionniers d'une technique nouvelle de composition. Un chapitre spécial sera consacré à chacun d'eux, afin de mettre en lumière la portée de leurs travaux.

CHAPITRE II

HILLER, PÈRE DE LA MUSIQUE PAR ORDINATEUR

Lejaren Hiller a été avec le mathématicien Léonard Isaacson, le pionnier d'une nouvelle technique de composition musicale; la « Suite Illiac » pour quatuor à cordes, dont les trois premiers mouvements furent exécutés en création mondiale le 9 août 1956 à un concert de l'Université de l'Illinois, est la première œuvre de musique calculée par l'ordinateur.

Historique d'une démarche

Hiller et Isaacson exposèrent les principes de base de leur démarche et les moyens employés pour réaliser l'œuvre dans le premier livre consacré à une étude de l'emploi d'un ordinateur dans la composition musicale, « Experimental Music »[1], paru en 1959. C'est en 1958 que Lejaren Hiller fonde à l'Université de l'Illinois le Studio de Musique Expérimentale, où se poursuivent activement sous sa direction, depuis cette date, des recherches consacrées à la composition de partitions musicales, à l'analyse et à la synthèse des sons par ordinateur. Robert Baker, Herbert Brun, le mathématicien John Myhill viendront dans les années suivantes travailler au Studio de Musique Expérimentale.

Avec Robert Baker, Lejaren Hiller met au point un programme compilateur (initialement pour l'ordinateur I B M 7090, puis pour l'I B M 7094 dont est actuellement équipée l'Université de l'Illinois); le « MUSICOMP » (*M*usic *S*imulator Interpreter for *Comp*ositional) utilise des sous-programmes aptes à résoudre des problèmes divers de composition, et peut donc servir de base pour des investigations plus approfondies dans le domaine de la composition musicale par ordinateur.

Le professeur Hiller et Robert Baker testèrent et exploitèrent les possibilités du « MUSICOMP » en composant la « Computer Cantata » achevée en 1963, qui comprend cinq strophes, employant en séquences cinq approximations successives (de l'ordre o au quatrième ordre) du parler anglais. Les auteurs désiraient examiner l'effet musical d'une augmentation dans l'ordre du contrôle stochastique, et le professeur Hiller pense qu'il est aisé de saisir, à l'audition, l'accroissement de l'organisation de strophe en strophe. Les prologues et les épilogues de ces strophes sont axés d'une part sur les programmes d'organisation rythmique des percussions de hauteur indéterminée, d'autre part sur la génération d'une musique totalement sérielle, et enfin la génération de musique avec des structures verticales et linéaires, employant des échelles tempérées de neuf à quinze notes par octave (cette dernière étude portant sur des sons synthétiques réalisés par ordinateur).

Une version complétée du MUSICOMP, accompagnée d'un « mode d'emploi » plus détaillé, est parue en 1966[1]. C'est un « modèle général pour la simulation des opérations de choix logique impliquées par la composition musicale ». Le style musical, les méthodes, la logique, l'instrumentation sont indépendants du programme, et donc laissés à la décision du compositeur qui l'utilise. Outre le programme principal, le MUSICOMP comprend divers sous-programmes et deux programmes permettant une sortie directement sous forme de sons, le dernier et le plus perfectionné employant l'ordinateur ILLIAC II et un convertisseur numéral-analogique.

Nous donnons ci-dessous un résumé des idées et de la technique exposées dans « Experimental Music »; outre l'intérêt historique présenté par la première expérience importante de composition musicale réalisée par ordinateur, ce livre contient le premier exposé de certaines notions qui ont pris une place considérable dans la musique contemporaine, et particulièrement dans le domaine de la musique par ordinateur : notion de degré d'ordre ou de désordre, expression du processus de composition en termes de sélections successives effectuées parmi tous les possibles musicaux selon les règles adoptées, etc...

Bases esthétiques

Pourquoi programmer un ordinateur pour engendrer de la musique? Il est difficile de répondre à cette question, car une telle entreprise soulève immédiatement des questions fondamentales concernant la nature de la communication musicale et ses relations avec les structures formelles de la musique. Dans quelle mesure est-il possible d'exprimer des principes musicaux et esthétiques dans des formes adaptées à un procédé de calcul? Quel rôle peut prendre dans les arts créateurs une automation du type représenté par les ordinateurs?

Si l'on envisage l'acte de composition comme l'extraction d'un ordre de la multitude des possibles, il peut, au moins partiellement, être étudié quantitativement, au moyen du calcul des probabilités, et de certains principes généraux d'analyse provenant de la théorie de l'Information. Il devient donc possible d'employer l'ordinateur à l'étude des aspects du processus de composition qui peuvent être formalisés en ces termes :

1° La musique est une forme sensible gouvernée par des lois d'organisation assez exactement codifiables.

2° Les ordinateurs peuvent « créer un univers aléatoire » à partir duquel ils sélectionnent des séries d'informations ordonnées selon des règles imposées, musicales ou autres.

3° Le compositeur est traditionnellement guidé non seulement par les règles adoptées mais aussi par son « oreille »; l'ordinateur, lui, sera entièrement dépendant d'une rationalisation et d'une codification de cette « oreille ».

Le professeur Hiller suivit pour ses travaux différentes étapes. Il dut d'abord sélectionner un style d'écriture simple et bien connu afin de l'utiliser comme base pour édifier une technique élémentaire d'écriture polyphonique. Il choisit une version simplifiée du contrepoint strict.

Il entreprit ensuite de démontrer, après un codage approprié, que des techniques musicales « standard » d'écriture peuvent être manipulées par un ordinateur convenablement programmé, la première expérience réalisée étant la production de « cantus firmi » académiquement corrects.

Il démontra ensuite qu'un ordinateur peut produire des structures musicales nouvelles, dans un style plus moderne, donc qu'il peut être utilisé par les compositeurs contemporains pour élargir les techniques actuelles de composition.

Enfin il utilisa l'ordinateur d'une façon insolite pour produire des sortes de musique radicalement différentes, basées sur de nouvelles techniques d'analyse musicale. Au cours de cette dernière expérience, une démarche reposant sur les procédés traditionnels de composition est illustrée.

A chacune de ces quatre expériences correspond l'un des quatre mouvements de la suite Illiac pour quator à cordes.

Cinq principes de base sont impliqués dans la composition musicale, selon les postulats esthétiques adoptés par le professeur Hiller :

1° La composition d'une œuvre est un processus de mise en ordre dans lequel les éléments musicaux sont sélectionnés parmi une infinité de possibles.

2° Une structure musicale n'est pas seulement faite d'ordre, mais aussi d'un relatif manque d'ordre, voire de chaos. Cela revient à dire que le degré d'ordre imposé est lui-même une variable significative.

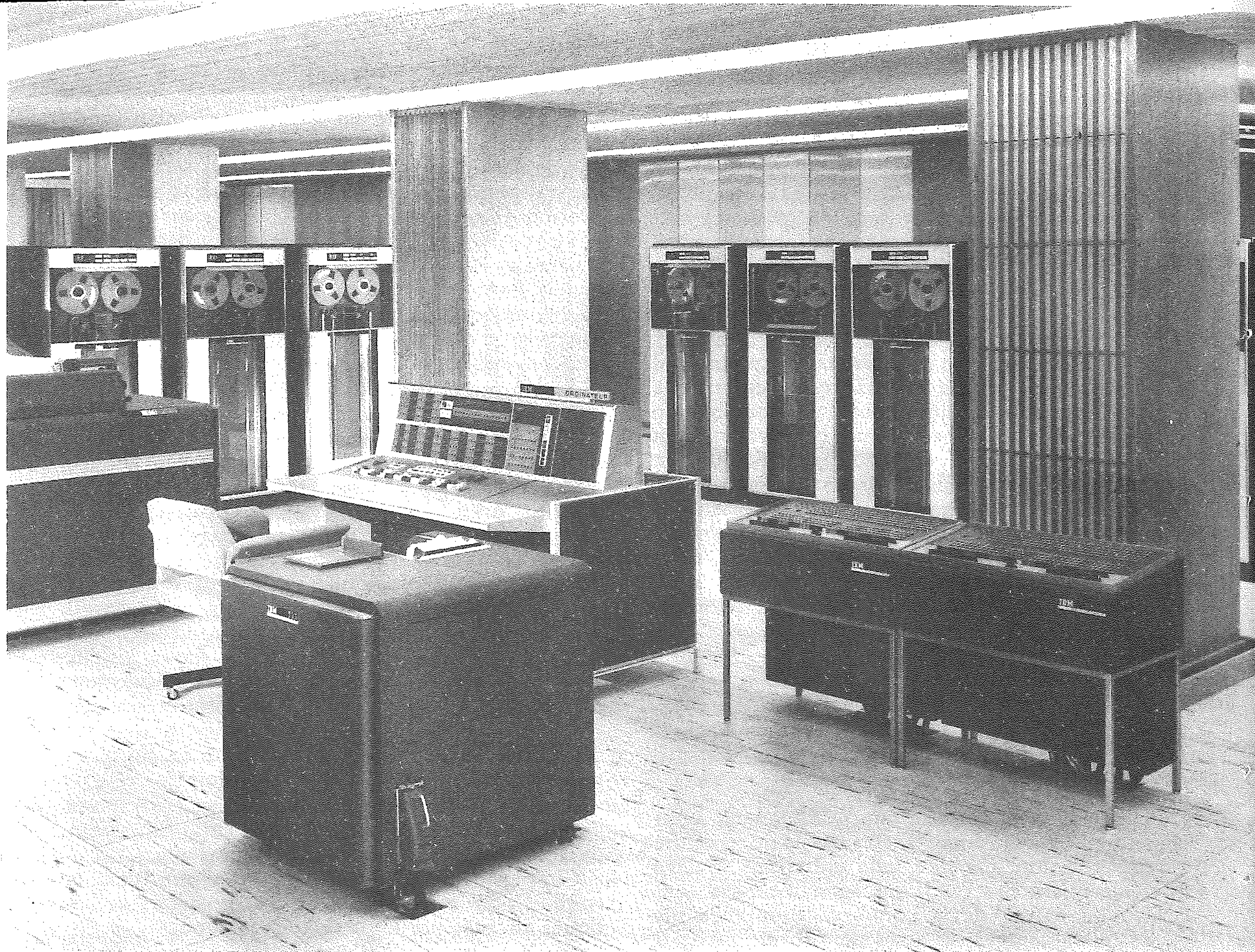
3° Les deux plus importants paramètres musicaux auxquels un plus ou moins grand degré d'ordre peut être imposé sont la hauteur et le temps. Le niveau dynamique et le timbre requièrent aussi un ordre, mais seront, pour des raisons de simplification, considérés comme moins significatifs.

4° La musique existe dans le temps; la mémoire, aussi bien que la perception instantanée, sont nécessaires pour la compréhension des structures musicales.

5° La tonalité, un concept ordonnateur significatif, sera considérée comme une mise en ordre des hauteurs en fonction du rappel de la mémoire.

1. Mac Graw Hill Book Company 330 West 42 nd Street New York 36.

1. Revised MUSICOMP Manual, written and edited by L.A. Hiller, Jr, and A. Leal May 1966.



Du calcul à la musique : un ensemble IBM

Strawinsky définit l'art comme « ... le contraire du chaos. Il ne s'abandonne jamais au chaos sans qu'immédiatement ses œuvres vitales, son existence elle-même, soient menacées. (...) Procéder par élimination, savoir comment écarter... c'est la grande technique de sélection »[1].

Comment l'ordre est-il imposé ?

Hiller considère que le plus important des paramètres musicaux auxquels l'ordre sera imposé est la hauteur. Il faut déterminer dans quelle mesure le procédé de sélection adopté sera restrictif. Mais la musique, comme le langage, repose sur une série de sélections successives, puisqu'elle existe dans le temps. Les restrictions imposées à la sélection des hauteurs conduisent aux échelles, et finalement à l'harmonie; imposées à la dimension du temps, elles mènent au développement du mètre et du rythme, et finalement à l'organisation sur une grande échelle des structures musicales.

Monodie : Hiller utilise l'habituelle échelle chromatique; il remarque que c'est la succession des intervalles entre deux notes, plutôt que les hauteurs elles-mêmes, qui donne à une mélodie son profil caractéristique. L'imposition d'un style donné entraîne le choix de règles spécifiques d'écriture mélodique, règles qui gouverneront la nature de la sélection des intervalles successifs.

Polyphonie : en impliquant l'interaction simultanée de deux au moins ou de plusieurs lignes mélodiques, la polyphonie est un trait caractéristique de la musique, qui la distingue du langage. Les principes de l'opération restent fondamentalement les mêmes, mais l'interaction des lignes mélodiques requiert l'imposition de règles d'harmonie et de contrepoint.

1. Poetics of Music Harvard University press Cambridge Mass. 1947.

Depuis les temps anciens, la compréhension de la musique a été reconnue comme reposant sur la perception de ce qui se produit dans le présent immédiat, mais reliée à ce qui a déjà été perçu et reste dans la mémoire. Aristoxène écrivait : « La cognition musicale implique la reconnaissance simultanée d'un élément permanent et d'un élément variable. (...) La compréhension de la musique repose sur deux facultés, la perception sensorielle et la mémoire; car nous devons percevoir le son qui est présent et nous souvenir de celui qui est passé. D'aucune autre façon, nous ne pouvons suivre le phénomène musical »[1].

C'est très important, car le professeur Hiller considère que la temporalité de la musique est à la racine de techniques telles que répétitions thématiques et rythmiques, développements, de structures telles que les formes sonate, fugue, variation et même de l'idée de tonalité. Il définit la tonalité comme une organisation tonale basée sur un point de référence de hauteur pour une œuvre. Une composition sera tonale si elle possède un point de référence de hauteur fixe, polytonale si elle en possède plusieurs, et atonale si elle n'en possède aucun. Le point de référence peut aussi changer dans le cours d'une composition. La tonalité est traitée comme un paramètre qu'on peut mesurer et contrôler.

Les hauteurs spécifiques prennent une signification parce qu'elles sont en relation, par des intervalles spécifiques, à travers un espace de temps, avec un centre tonal spécifique. Ce sont ces relations d'intervalles à long rayon dont la compréhension nécessite l'intervention de la mémoire, et qui sont utilisées pour édifier des structures musicales reposant sur la cohérence tonale utilisée comme principe d'organisation. Le professeur Hiller souligne la différence entre ce principe d'organisation générale et celui des relations entre intervalles successifs, qui dépend plus directement de la perception sensorielle immédiate, et sur lequel sont presqu'entièrement basées les règles de contrepoint rigoureux.

Enfin, le professeur Hiller résume les généralités de la théorie de l'Information et de son application au domaine de la musique.

La théorie de l'Information a pour objet de définir la quantité d'information contenue dans un message. Les systèmes de communication sont en gros classés en trois catégories principales : continus ou discrets, discontinus, et mixtes. Si une série de choix est effectuée parmi un nombre fini de possibles, chaque contrainte imposée à la liberté de choix entraîne une diminution de l'information, conséquence de l'introduction de « redondance », notion qui est reliée à l'ordre tout comme celle d'information est liée au désordre. « En termes de statistiques, écrit Weaver[1], les deux mots information et incertitude se trouvent être associés. »

« L'information est une fonction du rapport du nombre de réponses possibles avant et après un processus de choix, et nous avons choisi une loi logarithmique afin d'assurer l'additivité de l'information contenue dans des situations indépendantes »[2].

Le professeur Hiller introduit aussi la notion d'entropie, qui est essentiellement une mesure du degré de désordre ou de hasard, « d'information manquante », contenu dans un système physique. Quand l'ordre décroît, l'entropie augmente, et vice versa.

La musique est considérée comme un système de communication discontinu; la texture de base de la notation musicale est un assemblage de symboles discrets (exception faite des changements continus de dynamiques). Restreindre le nombre de choix parmi les possibles tendrait à augmenter la « signification » des messages, le type le plus diffus de musique étant produit par des sélections successives de notes effectuées au hasard. Facile à générer par ordinateur, la musique de ce type a été utilisée par le professeur Hiller comme substance de base pour « façonner des structures plus caractéristiques », le problème étant de choisir une technique pour restreindre les choix successifs.

Techniques employées

Méthode de Monte Carlo : l'ordinateur peut créer des nombres de hasard par millions. Lorsque ces nombres sont produits, ils sont examinés et triés selon les besoins du problème à résoudre, jusqu'à ce que, graduellement, une approximation de plus en plus exacte de la réponse à ce problème soit obtenue. Pour y parvenir, les lois de la théorie des probabilités sont appliquées, avec les restrictions nécessitées par le cas étudié, afin que les entiers aléatoires en désaccord avec ces restrictions soient éliminés. Cette technique, depuis qu'on peut disposer d'ordinateurs, a été appliquée avec succès à nombre de problèmes complexes.

Le professeur Hiller l'a employée pour la com-

1. Aristoxenus. The Harmonics (ed. and trans. by Macran. Oxford University Press New York, 1902).

1. Shannon and Weaver. The Mathematical Theory of Information. University of Illinois press. Urbana, 1949.
2. Brillouin. Science and Information Theory. Academic press. Inc. New York, 1956.

position musicale, décomposant le processus en deux opérations :

1° Génération au hasard (à une vitesse de plus de mille par seconde) de nombres entiers correspondant à des notes de l'échelle musicale, à des types rythmiques, à des dynamiques ou à des façons de jouer de l'instrument.

2° Filtrage de ces nombres au moyen de tests arithmétiques exprimant des règles de composition, en fonction desquelles certains d'entre eux sont rejetés, les autres étant utilisés pour bâtir une « composition ». Si un nombre est rejeté, un autre est créé et examiné; et ce processus est répété jusqu'à ce qu'une note satisfaisante soit trouvée; s'il n'en existe pas, la composition effectuée jusque-là est effacée automatiquement et le processus prend un nouveau départ. Le nombre des essais est fixé à cinquante au moyen d'un compteur.

Un processus souvent employé pour travailler les données obtenues avec la méthode de Monte Carlo est celui de Markoff, qui engendre des séquences nommées « chaînes de Markoff ». Le professeur Hiller en donne une description claire et succincte : une urne contient cinq boules blanches, trois boules noires et deux boules rouges. Si l'on en tire une, il y a trois événements possibles : E_b = une boule blanche, E_n = une boule noire et E_r = une boule rouge.

On peut construire un modèle mathématique, dans lequel les événements sont représentés par des points. Pour chaque point, une fonction de distribution définit une probabilité p. Par exemple $p(E_B) = 5/(5+3+2) = 1/2$. Si l'on associe les points avec des nombres, la fonction qui les associe est nommée variable aléatoire ou variable stochastique. Pour les boules de l'urne, on peut définir ainsi la variable aléatoire x :

x	E_b	E_n	E_r
	0	1	2

La fonction qui décrit la probabilité de x est nommée fonction de probabilité f (x). Ici nous avons : $f(0) = 0{,}5$; $f(1) = 0{,}3$; $f(2) = 0{,}2$.

Cela étant, considérons une séquence de tirage des boules de l'urne soumise aux conditions suivantes :

1° Après chaque tirage la boule sera replacée.

2° Si deux boules de même couleur sont tirées l'une à la suite de l'autre, la seconde sera replacée sans que l'événement soit enregistré; c'est un processus de Markoff. Si $pr_{E_1}(E)$ est la probabilité de l'événement E, l'événement précédent étant E_1, pour la séquence précédente on aurait par exemple :

$$pr_{E_b}(Eb) = 0$$
$$pr_{E_n}(Eb) = 5/7$$
$$pr_{E_r}(Eb) = 5/8 \text{ etc}$$

La chaîne de Markoff est dite d'ordre zéro si un choix est effectué sans tenir compte de l'événement précédent, d'ordre premier, si le choix est effectué en tenant compte de l'événement précédent, d'ordre second, s'il est tenu compte des deux événements précédents, et ainsi de suite.

Les quatre phases des recherches

Ces premières recherches sur la composition musicale par ordinateur se sont faites en quatre étapes, quatre expériences.

Première expérience. Le professeur Hiller se proposait de mettre au point une technique permettant la composition automatique d'un type de mélodie simple mais reconnaissable, et d'une polyphonie simple. Un nombre limité de règles de contrepoint strict (extraites du Gradus ad Parnassum publié en 1725 par J.J. Fux, et qui codifiait les règles de composition de Palestrina), furent adoptées. Pour simplifier le codage, la sélection des notes s'effectue parmi les hauteurs qui composent la gamme de DO majeur (touches blanches du piano), sur deux octaves, les notes étant numérotées de zéro à quatorze.

Un premier programme permit l'obtention de mélodies de trois à douze notes, observant les règles mélodiques d'un Cantus Firmus. Un second programme permit une écriture musicale à deux parties tenant compte de certaines règles dans les relations verticales entre les deux voix (secondes, septièmes, et quartes interdites, cadence parfaite en DO majeur obligatoire dans les deux derniers accords, etc...). Dans le troisième programme, la technique décrite fût appliquée à une écriture musicale à quatre voix, avec interdiction de répéter successivement la même note plus d'une fois. Le contrôle de l'application des règles verticales aux voix se fait deux par deux : voix 1-2, 1-3, 1-4, 2-3, 2-4, 3-4. Ceci devient l'entrée du « sous-programme harmonie » de la deuxième expérience.

Le résultat de cette première expérience est le premier mouvement de la Suite Illiac, divisé en trois sections : presto, andante, et allegro, correspondant à l'écriture monodique, puis à deux parties, et finalement à quatre parties. La distribution des Cantus Firmi parmi les quatre instruments et l'attribution des dynamiques se fait au moyen de nombres entiers, de 1 à 4, fournis aléatoirement par l'Illiac.

Seconde expérience. C'est un perfectionnement de la méthode d'écriture à quatre voix. Des règles d'écriture peuvent être ajoutées ou supprimées par simple modification du code. La sortie générée va d'exemples d'arrangements des notes purement aléatoires aux arrangements les plus stricts, obéissant à toutes les règles impliquées.

Le programme principal (Fig. 1) dirige les opé-

tions de sélection des hauteurs, faisant appel au oment voulu au sous-programme mélodique qui ontrôle l'application des règles d'écriture horizonle à chaque voix, et au sous-programme harmoique (Fig. 2) qui contrôle les rapports entre les oix, deux par deux comme il a été expliqué précédemment. Les arrangements les plus stricts rent d'abord créés, puis les règles furent proessivement supprimées, les tests qui les expriment ant sautés au moyen d'ordres de transfert incontionnels.

A cette expérience correspond le deuxième mouement de la Suite Illiac, l'adagio. Ce mouvement bute avec deux échantillons de musique purement aléatoire (toujours dans la limite de quatorze touches blanches du piano) et, par la réintroduction progressive des règles, parvient pour les quatre dernières mesures à une écriture contrapunctique tout à fait stricte.

Troisième expérience. Dans une première partie, une méthode fût mise au point pour générer des types rythmiques, des valeurs de dynamiques et des façons de jouer pour les instruments à cordes. En voici le détail en ce qui concerne les rythmes :

Ayant arbitrairement fixé un type métrique simple, $\frac{4}{8}$ (quatre croches par mesure), le professeur Hiller établit un tableau des rythmes possibles,

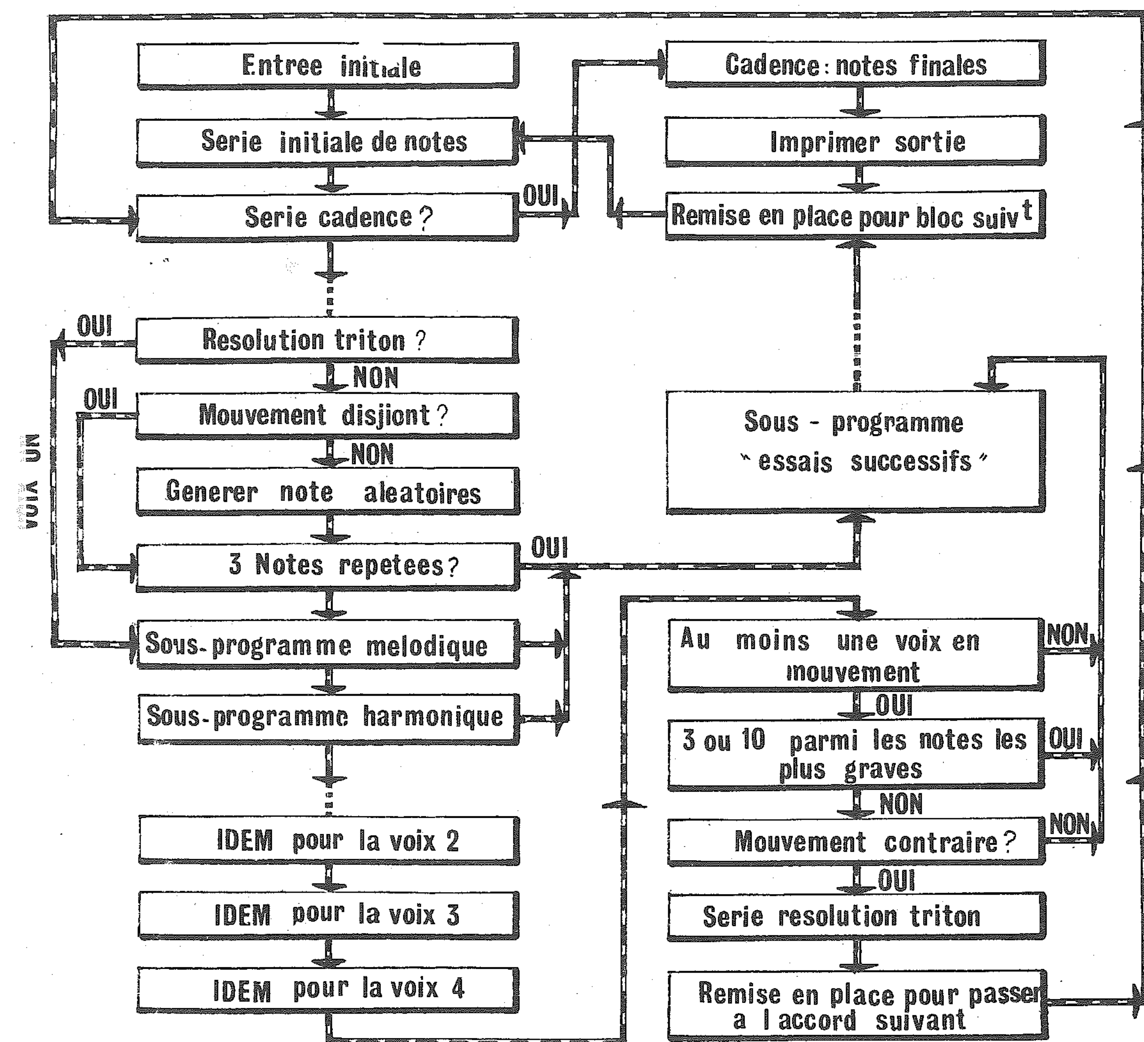


Fig. 1. — *Organigramme pour le programme principal. (Expérience II).*

po:
deı
1
de
poı
typ
faç
2
arit
tior
son
une
autr
jusq
s'il 1
là e
pren
est f
U
les c
Carl
séqu
prof
et sı
blanc
Si l'o
E_b =
et E_r
On
dans
point
butio
p (E_B
point
est nc
tique.
ainsi

La
nomm
avons
Cela
des bc
vantes
1° A
2° S
l'une à
sans qı
cessus
de l'év
pour la

La cha
choix e
précéde
en tenaı

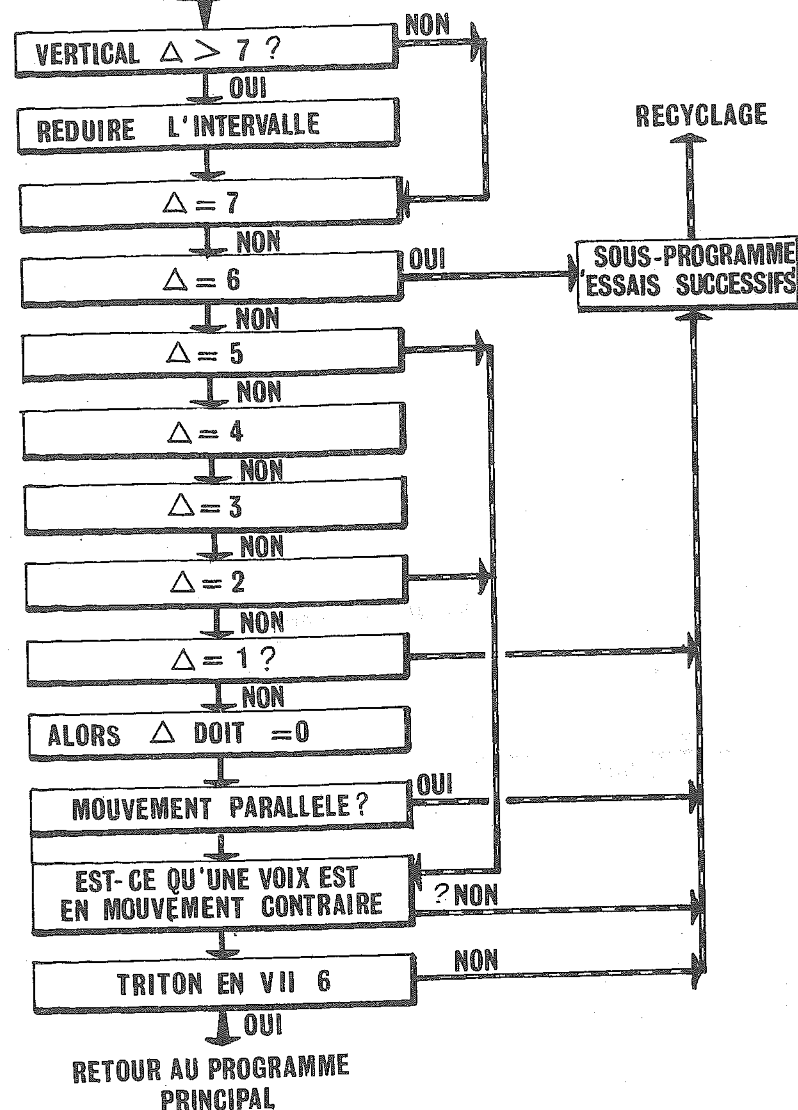


Fig. 2. — *Expérience II : organigramme pour le sous-programme harmonique.*

allant jusqu'à la croche, dans la mesure à $\frac{4}{8}$ (Fig. 3).

Le nombre 1 exprime l'attaque de la note, le 0 une tenue de la note précédemment attaquée, ou un silence. Un nombre binaire de quatre chiffres représente les quatre temps d'une mesure, et les seize permutations de ces nombres à quatre chiffres sont numérotées de 0 à 15, ce qui permet des choix successifs au moyen de nombres entiers (0 à 15) aléatoires. Pour réduire la part du hasard dans la distribution des rythmes, une redondance, so forme de répétitions littérales, est introduite, moyen d'un nombre entier, entre 1 et 12, aléatoi et indiquant pour chaque voix le nombre de mesu conservant un type rythmique identique. Enf une redondance verticale fût introduite (avec p séance sur la règle précédente), au moyen d' troisième nombre entier aléatoire compris en zéro et quinze et correspondant aux combinaisc de nombres binaires indiquées sur le schème

base; 0 0 0 0 signifie que les quatre voix ont des rythmes générés indépendamment, 1 1 1 1 qu'elles ont toutes le même rythme, etc...

Ce code fût d'abord combiné avec celui qui permet de produire des hauteurs de façon aléatoire. La phase suivante de cette expérience étendit le champ des hauteurs possibles à l'échelle chromatique prise dans une étendue de deux octaves et demie (sons 0 à 30). Quatre règles furent choisies, qui imposaient un degré d'ordre relativement élevé avec un minimum d'instructions :

1° Pour l'écriture mélodique, un intervalle disjoint ne peut être suivi que par un demi ton, un ton ou une note répétée, et inversement un intervalle d'un ton ou moins peut être suivi par n'importe quel intervalle disjoint autorisé.

2° La tessiture dans laquelle se meut la ligne mélodique est limitée à une octave donnée pour une durée de vingt-quatre notes (six mesures maximum), ce champ d'une octave étant déplacé toutes les vingt-quatre notes.

3° Le seul contrôle harmonique concerne la résolution des tritons, qui est réglementée avec précision. (Le professeur Hiller remarque que ce choix de la résolution du triton comme seul contrôle harmonique reflète l'opinion de Hindemith, qui distingue deux types de base d'accords : ceux qui comprennent un triton et ceux qui n'en comprennent pas.)

NOMBRE DECIMAL	NOMBRE BINAIRE	RHYTMES AVEC LIASON	RHYTMES AVEC SILENCE
0	0000		
1	0001		
2	0010		
3	0011		
4	0100		
5	0101		
6	0110		
7	0111		
8	1000		
9	1001		
10	1010		
11	1011		
12	1100		
13	1101		
14	1110		
15	1111		

Fig. 3. — *Schéma de base rythmique pour la mesure à* $\frac{4}{8}$.

4° Si la règle du champ d'une octave se trouve violée par une résolution obligatoire de triton, le champ est automatiquement déplacé.

Enfin, la génération de séries de douze sons et de séries d'intervalles donne au professeur Hiller l'occasion d'effectuer une étude intéressante des relations entre la mélodie et l'entropie. Si les douze notes sont sélectionnées au hasard, sans restriction concernant les répétitions, 12^{12} mélodies sont possibles; en terme de choix, cette situation comporte un maximum d'information, d'entropie, mais ceci n'est pas forcément vrai en ce qui concerne la tonalité. La variété des types mélodiques s'étend entre ces deux extrêmes : le cas où les douze sons sont identiques, ce qui comporte un maximum de redondance et un minimum d'entropie, et une tonalité « maximale » établie avec évidence par les douze répétitions d'un même son. Le cas où les douze sons étant tous différents les uns des autres, chaque son se produit une et une seule fois, dans un ordre spécifique choisi arbitrairement ou aléatoirement. Or, on arrive à ce résultat par une technique qui est juste à l'opposé de celle qui mène à la « tonalité maximale ». Cela suggère que la série est une construction spécifiquement anti-tonale, délibérément arrangée pour exclure le type de redondance requit par la tonalité.

Le professeur Hiller fait entre série de sons et série d'intervalles la distinction suivante :

Dans la série de sons, deux intervalles successifs peuvent être identiques. Les sons ne peuvent pas être répétés.

Dans la série d'intervalles, la répétition est exclue entre deux intervalles successifs, qui ne peuvent donc pas être identiques. Les sons, par contre, peuvent être répétés à la même octave ou à une octave différente.

Des séries d'intervalles et des séries de sons ont été générées, ainsi que les différentes présentations des séries de sons.

La troisième partie de la Suite Illiac est une illustration de ces différentes démarches. Elle présente un style entièrement différent des parties précédentes; les deux premières parties étaient écrites dans un style parent de celui de la musique du XVI[e] siècle, très consonant et restrictif, assez clair à l'audition; la troisième partie semble beaucoup plus dissonante et complexe, plus proche d'une

INTERVALLE	VARIABLE STOCHASTIQUE V_j	FONCTION HARMONIQUE X_j	FONCTION DE PROXIMITE Y_j	FONCTION CONBINEE $Z_j = X_j + Y_j$
Unisson	0	13	13	26
Octave	12	12	1	13
Quinte	7	11	6	17
Quarte	5	10	8	18
Tierce majeure	4	9	9	18
Sixte mineure	8	8	5	13
Tierce mineure	3	7	10	17
Sixte majeure	9	6	4	10
Seconde majeure	2	5	11	16
Septieme mineure	10	4	3	7
Seconde mineure	1	3	12	15
Septieme majeure	11	2	2	4
Triton	6	1	7	8

$$\sum_{j=0}^{12} X_j = 91 \qquad \sum_{j=0}^{12} Y_j = 91 \qquad \sum_{j=0}^{12} Z_j = 182 = 2 \times 91$$

$$[X_j = X(V_j)] \qquad [Y_j = Y(V_j)]$$

Fig. 4. — *Expérience IV : table de fonctions pour la génération de chaînes de Markoff musicale.*

écriture musicale contemporaine. Il apparaît que la simplicité d'un style et son accessibilité sont en relation inverse avec la liberté de choix, le style le plus simple nécessitant les plus sévères restrictions et possédant le plus haut degré de redondance.

Quatrième Expérience. Cette expérience est appliquée à des lignes mélodiques, qui sont ensuite superposées pour former une polyphonie. Les intervalles mélodiques y sont considérés sous l'angle de leur dimension, conjointe ou disjointe (fonction de proximité) et sous l'angle de la relation qu'ils impliquent avec un point de référence; par exemple la ligne mélodique DO - MI - SOL implique une référence à la tonalité de DO majeur; c'est la fonction harmonique. Un tableau des fonctions (Fig. 4), attribue à chaque intervalle une variable aléatoire V_j (V_0, V_{12} etc), et pour chacune de ces variables est calculée la valeur de la fonction harmonique, de la fonction de proximité et la somme de ces deux fonctions. D'après la fonction harmonique X_j, l'unisson, en moyenne, se produira treize fois pour une seule apparition du triton.

La texture de la musique gouvernée par ce tableau peut être modifiée en changeant les rapports des différentes valeurs attribuées aux variables aléatoires pour une fonction donnée; si toutes les valeurs sont égales, il y aura équiprobabilité pour tous les intervalles.

Comme il a été dit précédemment, dans une ligne mélodique, si chaque note est isolée, indépendante de celle qui la précède (N_n indépendant de N_{n-1}), c'est une structure du type chaîne de Markoff ordre zéro. La mélodie est alors conditionnée uniquement par les probabilités de transition, et peut être faite d'intervalles principalement conjoints ou disjoints selon le dosage des probabilités. On peut trouver dans la musique traditionnelle de nombreuses règles qui relèvent de ce type d'organisation (intervalles interdits dans une monodie, résolutions obligatoires pour certains accords en polyphonie).

Si l'on prend une chaîne de Markoff de premier ordre en musique, cela signifie par exemple qu'un intervalle I dépendra de celui qui l'a précédé, le choix de I_i dépend de I_{i-1}. Le professeur Hiller a concilié cette règle avec le tableau des fonctions reproduit figure 4, de la façon suivante : pour le choix d'un nouvel intervalle I_i, la plus faible probabilité d'occurrence sera attribuée à l'intervalle identique à I_{i-1}, et le plus forte probabilité à l'intervalle le plus différent de I_{i-1}.

Le principe de la chaîne de Markoff d'ordre zéro et d'ordre premier a aussi été appliqué à des fonctions produisant des temps forts et des temps faibles.

L'ensemble des essais formant la quatrième expérience ont fourni les résultats qui ont permis de constituer la quatrième partie de la Suite Illiac.

Une œuvre offrant l'illustration sonore du cheminement d'une recherche : ainsi se présente la Suite Illiac. Au cours de cette toute première démarche, le professeur Hiller a, dans une technique alors entièrement nouvelle, posé les premières bases, ouvert des voies qui se sont révélées fructueuses. Et il a montré que la technique de composition par ordinateur peut être l'occasion d'une réflexion approfondie sur les techniques de composition traditionnelles, aussi bien que la recherche de structures nouvelles.

CHAPITRE III

PIERRE BARBAUD ET LA MUSIQUE ALGORITHMIQUE

Élaboration des programmes grâce auxquels un ordinateur pourra créer des œuvres musicales en appliquant les lois aléatoires; des recherches consacrées à la découverte de « la généralité des structures fondamentales de la musique »[1] et à la définition d'une expression universelle, accessible aux non-spécialistes, des phénomènes musicaux; la vérification de l'exactitude des structures abstraites établies par la simulation de l'harmonie classique et de son évolution au moyen d'un ordinateur; ces travaux définissent l'homme, Pierre Barbaud, son esprit vif et curieux, son sens aigu de la recherche et de l'abstraction, son goût du jeu intellectuel pur, détaché de tout contexte sentimental.

Musique et théorie des ensembles

« Lorsque la nature nous fournit l'objet brut qu'est un son et sa résonance, l'homme tout naturellement abstrait cet objet, le débarrasse de ses adjectifs, en fait un être qui soit à même d'avoir avec d'autres êtres des relations ensemblistes, jus-

1. Pierre Barbaud. La musique discipline scientifique. Dunod Éditeur.
2. Idem.

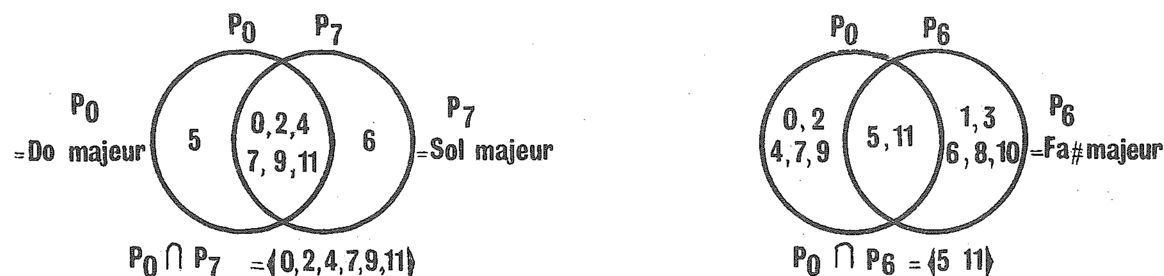


Fig. 1. — *Intersection de P_0 et P_7 . P_0 et P_6.*

qu'à le plonger au sein d'un ensemble muni d'une structure, en un mot, un être soumis au calcul. C'est à cette tendance que nous devons la floraison du contrepoint médiéval, c'est à elle que nous devons sans doute toute la musique »[2]. Et c'est ainsi que Pierre Barbaud, en dégageant les structures sous-jacentes à la musique, montre les rapports étroits existant entre l'univers tonal de la musique classique et celui des nombres entiers; depuis Schoenberg qui posa les bases du système dodécaphonique, ces rapports entre la musique et les nombres ont été de plus en plus explicités, exploités, diversifiés; dans cette optique, l'utilisation des lois aléatoires, la génération de partitions chiffrées au moyen de programmes pour ordinateur, s'inscrivent dans une évolution parfaitement logique de la pensée musicale.

En nommant x la fréquence la plus grave utilisée par les musiciens par exemple le LA grave du piano, on peut obtenir une expression numérique en fonction de x, de l'ensemble des fréquences correspondant à la gamme chromatique reproduite de l'extrême grave à l'extrême aigu :
extrême grave : $x.\ 2^{0/12}$, $x.\ 2^{1/12}$, $x.\ 2^{2/12}$, ... $x.\ 2^{11/12}$ (une octave)
extrême aigu : $x.\ 2^{6}$ (six octaves), $x.\ 2^{73/12}$, x. $x.\ 2^{74/12}$, ... $x.\ 2^{83/12}$, $x.\ 2^{7}$ (sept octaves).

L'octave n'étant pas obligatoirement divisée en douze parties égales, toute gamme chromatique possible peut être exprimée par la formule

$$G = \{ 2^{a/n} \} \quad a, n \text{ entiers}, \quad n \neq 0$$

Pour la gamme en quarts de tons, $n = 24$, et pour la gamme par tons $n = 6$.

Voici l'ensemble des douze notes de la gamme chromatique traditionnelle, nommée Z/12 :

Z/12 = { 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 }
DO DO♯ RÉ RÉ♯ MI FA FA♯ SOL SOL♯ LA SI♭ SI♮

Z/12 possède une structure de groupe : la loi additive (addition ici correspond à transposition) est associative, elle comporte un élément neutre, O, DO dans la notation employée ci-dessus. Enfin pour l'élément symétrique :

$$a + a^{-1} = a^{-1} + a = 0,$$

a^{-1} correspond au renversement. La loi multiplicative des fréquences est en correspondance avec la loi additive de leurs logarithmes.

La gamme de DO majeur, nommée P_0, est une partie de Z/12

$$P_0 = \{ 0, 2, 4, 5, 7, 9, 11 \}$$
do ré mi fa sol la si

En additionnant un même élément x, ($x \in Z/12$), à chaque élément de P_0 on obtient une famille de 12 ensembles correspondant aux douze tonalités majeures. Ajoutons par exemple 7 à P_0 : (addition modulo 12)

P_0 = { DO RÉ MI FA SOL LA SI }
{ 0 2 4 5 7 9 11 }
+ 7 = { 7 9 11 0 2 4 6 }
= P_7 { Sol La Si Do Ré Mi Fa dièze }

En additionnant 7 à P_0, on a réalisé une modulation de DO Majeur à Sol Majeur. L'harmonie classique établit entre les différentes tonalités des chemins préférentiels déterminant des « tons voisins »; plus le cardinal de l'intersection entre deux parties de l'ensemble P est élevé, plus les tons correspondant sont voisins (Fig. 1).

La tonalité P_7 ne diffère de P_0 que par un élément, elle en est le ton le plus voisin. Au contraire, P_6 n'a que deux éléments communs avec P_0, les 5 autres éléments étant différents; P_6 est une tonalité éloignée de P_0.

Nous venons d'examiner les règles présidant à la succession des sons dans le temps; dans la même optique, on peut envisager la simultanéité de plusieurs sons; l'harmonie classique est basée sur la notion de « consonance », issue de la résonance naturelle des corps sonores; si l'on prend un son x comme son de base ou fondamentale, ses résonances naturelles seront approximativement : x, x, x + 7, x, x + 4, x + 7, x + 10, x, x + 2, x + 4, x + 6; soit, en partant de Do : DO, DO, SOL, DO, MI, SOL, SI bémol DO, RÉ, MI, FA dièse, ceci en tenant compte du tempérament. Pour x = 0, nous aurons l'harmonie H_0 = { 0, 4, 7, 10 }. De la même façon que pour les gammes Px, en additionnant aux éléments de Hx un élément appartenant à Z/12 on obtient une famille de douze ensemble, de H_0 à H_{11}, correspondant à l'accord de « septième de dominante » dans les douze tonalités différentes. On a $Hx \subset P_{x+5}$, c'est-à-dire que par exemple H_7, l'accord de dominante sur SOL, n'est inclus que dans P_0, (la gamme de DO).

Si l'on réduit les Hx aux trois résonances suivantes d'un son x : Hx = { x, x + 4, x + 7 } on obtient l'accord parfait majeur. L'accord parfait mineur sera noté : Xx = {x, x + 3, x + 7, } la tonalité relative mineure de Px sera P'x.

L'ensemble des accords parfaits que l'on trouve sur les degrés de la gamme P sera noté

$$Tx = \{ H_x, X_{x+2}, H_{x+4}, H_{x+5}, H_{x+7}, X_{x+9} \}$$

On peut former un graphe avec ces six éléments, en reliant entre eux par des arcs appropriés ceux qui sont susceptibles de se succéder en respectant les règles fixées. Par une succession d'arcs on établit un chemin. Des graphes différents peuvent être reliés entre eux par des arcs correspondant aux points composés des mêmes sons; par exemple $T_2 \cap T_7 = \{ H_2, H_7, X_4 \}$ c'est-à-dire que les accords parfaits communs à RE et à SOL sont RÉ, FA dièse, LA, SOL, SI, RÉ, et MI, SOL, SI; les arcs qui relient ces accords identiques dans des graphes différents ne provoquent pas de modulation, nous les nommerons arcs de premier ordre. Mais chacun des graphes T_x sera relié à un ensemble composé de T_{x+2}, T_{x+5}, T_{x+7} et T_{x+10} par 14 arcs dits secondaires qui provoquent les modulations. Cette nouvelle partie de l'ensemble T engendre, par l'addition des éléments de Z/12 aux indices, douze ensembles ayant entre eux des intersections et reliés entre eux par des arcs dits tertiaires.

Différentes probabilités peuvent être attribuées aux différents arcs au moyen de matrices stochastiques, ces probabilités étant soit arbitraires soit en référence avec un compositeur ou une époque donnés.

Des règles permettent d'obtenir l'enchaînement des accords, leur « alignement » dans la technique présente, selon les lois de l'harmonie classique.

composition automatique

a) Méthode employée

Cette méthode de composition peut être purement automatique et sa réalisation confiée à un ordinateur; elle comprend un ensemble de règles de classement établies en fonction d'un but déterminé (dans le cas que nous venons d'étudier, ce but était la simulation de l'harmonie classique); cela constitue le programme à fournir à la machine; les données de ce programme sont un ensemble de décisions possibles prises une fois pour toutes. Le hasard est canalisé dans le programme et dans ses données. Les partitions obtenues permettent de vérifier le bien-fondé des règles et de la méthode employées.

b) Notation

Hauteurs :

Z/12 = { 0, 1, 2, 3,... 9, 10, 11 } =
gamme chromatique tempérée.
D = { 0, 1, 2,... 6 } =
les sept octaves du clavier d'un piano.
Z/12 × D = { 000, 001, 002...
009, 010, 011, 100, 101... 609, 610,
611 } =
total des douze sons de la gamme chromatique répartis sur les sept octaves du clavier.
000 = 65,4 Hz = DO_{-3}
611 = 7902,2 Hz = SI_3
Silences : 800 (notation conventionnelle).

Durées :

Ce sont des multiples ou sous-multiples d'une unité de durée choisie arbitrairement (Fig. 2).

307 1
308 0 unité : la noire
309 1 deux dans un et un dans un

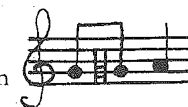


Fig. 2.

307 2
308 0 Unité : la noire
309 0 Trois dans deux noires

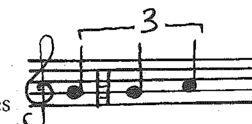


Fig. 2 *bis.*

Cette méthode a permis à Pierre Barbaud d'établir un processus de composition automatique aboutissant aux programmes rédigés en Algol et destinés à l'ordinateur B-GE. Certains de ces programmes étaient orientés vers la simulation de l'harmonie classique, afin de continuer les études qui viennent d'être sommairement résumées. D'autres expérimentent des procédés de composition plus actuels.

La musique algorithmique

Avant d'analyser le programme Algom 7, il est bon de définir exactement ce qu'est la musique algorithmique, et de rappeler brièvement son historique.

Le nom d'algorithme est donné à un procédé qui permet de résoudre un problème au moyen d'une suite d'opérations simples, à répéter x fois, généralement dans un ordre codifié à l'avance. Le

compositeur de musique algorithmique emploie ce procédé pour élaborer une partition. Le premier algorithme employé en composition musicale, plusieurs milliers d'années avant notre ère, consistait à jeter un dé à six faces pour choisir les notes d'une mélodie pentatonique (cinq faces pour les notes, une face pour le silence.

C'est vers 1950 que Pierre Barbaud pense à « introduire la pensée mathématique et les méthodes qui en découlent dans la composition musicale ». Cette démarche s'inscrivait dans un courant de pensée qui, en France, avait conduit plusieurs musiciens, chacun de son côté, à envisager la composition musicale comme un calcul des événements sonores. « Soumettre l'apparition des événements sonores simples ou composés à un calcul, battre en brêche ce qu'il est convenu d'appeler « l'inspiration », canaliser le hasard dans des organigrammes, bref, remplacer par une activité lucidement envisagée la passivité mystique du compositeur devant la « muse », telles sont les idées qui voient le jour en cette période » écrit Pierre Barbaud[1] qui en 1958, associe Roger Blanchard à ses travaux et fonde le « Groupe Algorithmique » auquel viendra se joindre Janine Charbonnier.

Devant la complexité croissante des calculs, un recours à l'ordinateur s'impose. Le calculateur électronique se révèle indispensable pour mettre en œuvre un organigramme de quelque importance et pour utiliser les lois de probabilités, qu'elles soient arbitraires ou conformes à celles de modèles naturels. Grâce à l'accueil de la Compagnie des Machines Bull (devenue depuis Bull-General-Electric), les calculs de Pierre Barbaud purent passer du stade manuel au stade électronique.

Le compositeur s'obligea, par rigueur intellectuelle, à prendre les résultats obtenus tels quels, sans y changer quoi que ce soit, même s'ils lui paraissaient choquants ou peu conformes à son idée. Il pensait que « la prise de conscience de cette imperfection et son examen critique étaient la condition de tout progrès dans ce domaine. (...) Ce qui important, c'était à partir de résultats, imparfaits au nom d'une certaine morale musicale axiomatiquement fondée, de réparer, d'améliorer sans cesse la méthode de calcul, voire de la remettre totalement en cause si elle se révélait infructueuse ou vicieuse ».

La musique algorithmique se présente sous la forme de programmes qui depuis 1958, sont destinés au calcul électronique. A la Bull-General-Electric Pierre Barbaud a rédigé dix programmes en langage symbolique Algol; seuls les trois derniers, qu'il considère comme « la somme des améliorations successives et des remises en cause de ceux qui les ont précédés », sont actuellement exploités. Le compositeur compare l'élaboration d'un programme au dessin du plan d'une ville dont on ne sortira jamais, la promenade, le résultat, l'œuvre, faisant partie de la liste finie des promenades possibles.

Il est curieux de remarquer que plusieurs partitions de musique algorithmique, et ceci dès les débuts de cette technique de composition, furent des musiques de film. Pierre Barbaud a produit la musique de deux courts-métrages d'Alain Resnais, « Le Mystère de l'atelier 15 » (1957), et « Le Chant du Styrène (1958), de deux films de Niko Papatakis, « les abysses » (1964), et « les pâtres du désordre » (1968), et du film d'Agnès Varda « Les Créatures ». Voici l'opinion du compositeur sur la musique de film; opinion émise à propos de sa collaboration avec Alain Resnais :

« Quelle que soit la musique que vous placerez sous les images, je suis persuadé qu'il se produira toujours des correspondances fortuites, plus intéressantes que les correspondances voulues auxquelles les cinéastes croient dur comme fer et auxquelles je ne crois pas. Par exemple, l'image sur l'écran dira une certaine chose; la musique, de son côté, dira autre chose; ces deux choses n'ont rien de commun, par définition. Les lois de la musique et celles de l'écran ne sont pas les mêmes. Il se trouve pourtant qu'à tel ou tel moment les deux chemins vont se croiser, par hasard. Si vous laissez la musique et l'image aller chacune de leur côté, il y aura des correspondances, automatiquement. Mais si vous essayez de mouler la musique sur l'image, ou le contraire, vous gâcherez l'une et l'autre. Bien entendu, ces correspondances ne peuvent pas arriver tout le temps. Quand on marque tout, on ne marque plus rien »[1].

Cette opinion se trouve confirmée par un fait singulier : les musiques pour « les Abysses », « Les Créatures » et « Les pâtres du désordre », ont été remarquées pour leur originalité et leur parfaite concordance avec les images : or, Pierre Barbaud n'avait fait que « recueillir à la sortie de l'ordinateur la première œuvre venue en exploitant le programme avec des données quelconques, se contentant ensuite de la découper en morceaux d'inégale longueur correspondant à celle des séquences d'images qu'on lui avait indiquées ».

1. La musique discipline scientifique. Dunod éditeur, pp. 120-121.

1. L'arc n° 31. Alain Resnais ou la création au cinéma, p. 85 (revue trimestrielle, chemin de Repentance, Aix-en-Provence).

Pour la petite histoire de la musique algorithmique, il est intéressant de citer un second passage de l'article de Pierre Barbaud dans l'Arc :

« J'ai participé aussi à Hiroshima et à Marienbad, non plus comme musicien, mais comme acteur. Je garde un souvenir délicieux de mon séjour à Nevers. J'y suis resté quinze jours, pour tourner peut-être deux ou trois heures en tout. Je vivais enfermé dans ma chambre d'hôtel, à étudier les mathématiques. C'est là que j'ai eu l'idée de faire de la musique sur machine. Vous voyez qu'il y a aussi des correspondances dans la vie! »

Premiers éléments de programmation

Si Schoenberg avait eu à sa disposition un ordinateur, il aurait pu appliquer à la composition automatique les nouvelles lois qu'il avait établies. Ceci va permettre de donner un exemple simple de programmation en Algol.

Voyons comment fabriquer automatiquement une série en utilisant une variable aléatoire.

Le programme commence par la déclaration des identificateurs nécessaires pour les deux opérations à effectuer. Puis vient la description de la procédure, nommée arbitrairement « 'PRO'SERIE ».

Il s'agit d'établir une suite d'instructions permettant de remplir un tableau à une dimension, nommé SI $ (0 : 11) $ avec les douze notes d'une série désignées par les chiffres 0 à 11. Ces notes seront d'abord placées dans l'ordre 0, 1, 2... 11, le remplissage du tableau chiffre par chiffre, étant réglé par un « compteur » 'Pour' M : = O 'PAS' 1 'JUS'11; l'opération sera donc effectuée douze fois, après quoi l'ordinateur passe à l'instruction suivante. Cette forme d'opération à répétitions se nomme boucle; elle correspond à l'organigramme de la Figure 3.

Les douze nombres ainsi rangés dans le tableau seront ensuite permutés entre eux au moyen d'une variable aléatoire, les valeurs de N1 et de N2 étant lues dans les données. La variable aléatoire RA est le reste de la division de FA par 12 (Fig. 3 *bis*).

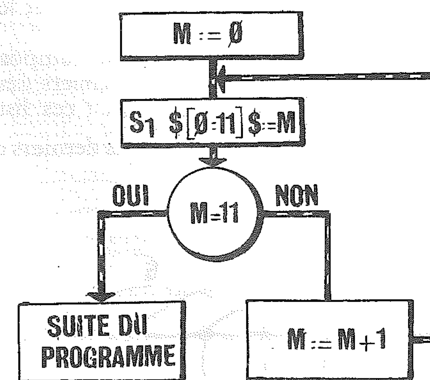


Fig. 3. — *Organigramme du remplissage du tableau SI par les chiffres 0 à 11.*

Le programme Algom 7

a) Généralités

Cet exemple assez simple de programmation en ALGOL peut servir de préparation à l'étude d'un programme complet de composition, le programme ALGOM 7 de Pierre Barbaud.

Ce programme permet d'obtenir, pour 30 instruments au plus (ou 30 timbres), la date d'apparition et la durée de chaque son, son intensité et bien entendu sa hauteur.

Les fréquences sont limitées à celles de l'ensemble D × Z/12, dans le cas de l'emploi pour des instruments traditionnels.

Le principe de base adopté pour ce programme est le suivant : pour un instrument de musique i, les limites inférieure et supérieure de la tessiture de cet instrument seront x_i et y_i. Pour un nombre n d'instruments, il y aura 2n nombres x_i et y_i. Sur une droite où sont portées les valeurs correspondant aux éléments de D × Z/12, les 2 n nombres x_i et y_i rangés par grandeurs croissantes vont délimiter un certain nombre de segments adjacents (Fig. 4).

Les points sont répartis inégalement sur la droite selon le choix des instruments. Les sons contenus dans le segment (a, b), ne peuvent être joués que par l'instrument 1, mais ceux contenus dans (i, j) peuvent être confiés aux instruments 4, 5 et 6.

Supposons maintenant un son z dont l'apparition a été contrôlée dans une autre partie du programme par une règle combinatoire ou par une loi de probabilité précisées dans les données; z, selon sa fréquence, appartiendra à l'un des segments de la droite. Mais si le segment comprend plusieurs instruments, z sera confié à l'un d'entre eux choisi au moyen d'une autre loi de probabilité. Les données du programme contiennent d'autres lois contrôlant l'apparition du médium, du grave ou de l'aigu sur l'ensemble de la tessiture ou sur une tessiture propre à un instrument particulier. L'analyse du programme ALGOM 7, reproduit partiellement (Fig. 5) montre le fonctionnement de ce système.

b) Analyse des procédures

Les identificateurs A, B, C,... Y, Z, sont déclarés réels, c'est-à-dire qu'ils peuvent s'appliquer à des nombres qui ne sont pas entiers. FA, QA et RA fournissent, comme montré dans l'exemple précédent, des variables aléatoires. Les tableaux à une ou deux dimensions, comme OCT, SI etc., seront explicités au fur et à mesure de leur emploi.

Les variables booléennes prennent la valeur VRAI ou FAUX. Les instructions sont affectées d'étiquettes qui permettent de s'y référer aisément, par exemple AAA, AAB, PROK, etc. Le pro-

```
'DEBUT' 'REE' A,B,M,FA,QA,RA,N1,N2◇ TAB S1 $ [0:11] $ ◇
'PRO' SERIE ◇ 'DEBUT'
'POU' M := Ø 'PAS' 1 'JUS' 11 'FAI'
S1 $ [M] $ := M ◇
N1 := DONNEE ◇
N2 := DONNEE ◇
'POU' M := Ø 'PAS' 1 'JUS' 11 'FAI' 'DEB'
FA := N1 + N2 ◇ 'SI' FA > 9973 'ALO' FA - 9973 ◇
QA := ENT [FA/12] ◇ RA := FA - QA ⊗ 12 ◇
A := S1 $ [M] $ ◇
B := S1 $ [RA] $ ◇
S1 $ [M] $ := B ◇
S1 $ [RA] $ := A ◇
FIN ◇
FIN ◇
```

Fig. 3 *bis*. — *Programme en Algol pour la génération aléatoire d'une série de 12 sons.*

gramme est divisé en procédures correspondant aux diverses opérations à accomplir.

Procédure VÉRONIQUE. Lecture des données, qui sont placées dans les 11 tableaux OCT. Cette procédure forme un bloc encadré par 'début' et 'fin', suivi de l'étiquette iter, qui provoque une itération du deuxième bloc, composé de toutes les autres procédures. Les mêmes données servent donc pour toutes les itérations. En tête du deuxième bloc sont déclarés les tableaux S_1, S_2, S_3, S_4 et S_5 composés chacun de 12 positions numérotées de 0 à 11.

Procédure MADELEINE. Les tableaux S_1, S_2, S_3, S_4 et S_5 sont remplis par les nombres 0, 1, 2... 10, 11, qui numérotent leurs positions. Deux restes R et RA tels que $0 \leq R < 100$ et $0 \leq RA < 1000$ sont fournis aléatoirement selon le processus expliqué dans l'exemple précédent.

Avant l'appel de la procédure, l'identificateur DK prend une des valeurs 1, 2 ou 3. La donnée DJ influence le choix aléatoire d'une de ces valeurs. Si DK = 1, les tableaux S_1, S_2 et S_3 seront pris en considération c'est-à-dire que 36 sons seront exposés. Si DK = 2, les tableaux S_1, S_2, S_3 et S_4 sont pris en compte dans le calcul (48 sons). Si DK = 3, les 5 tableaux définissent l'exposition de 60 sons. Suivant que DK a l'une des valeurs 1, 2 ou 3, on se reporte donc respectivement aux étiquettes AAAA, AAAB ou AAAC.

A chacun de ces niveaux, l'identificateur X prend une valeur dans une des listes OCT. En AAAA, la valeur de R définit, grâce à la fonction de répartitions PRO, lue dans les données, le choix d'une des listes OCT0, OCT1, OCT2 ou OCT3. En AAAB est choisie l'une des listes OCT4, OCT5, OCT6 ou OCT7. En AAAC le même procédé désigne OCT8, OCT9, OCT10 ou OCT11.

Les listes OCT0, OCT4 et OCT8 sont des fonctions de répartition favorisant l'apparition de sons graves. OCT1, OCT5 et OCT9 favorisent l'apparition de sons aigus, et OCT3, OCT7 et OCT11 répartissent également l'aigu, le moyen et le grave (Fig. 6).

Les listes OCT0 à OCT3 sont composées de nombres de 6 chiffres. Les trois premiers désignent un arrangement de 7 objets 3 à 3 : ces listes ont donc $\left[{7 \atop 3} \right] = 35$ positions. Les trois derniers chiffres

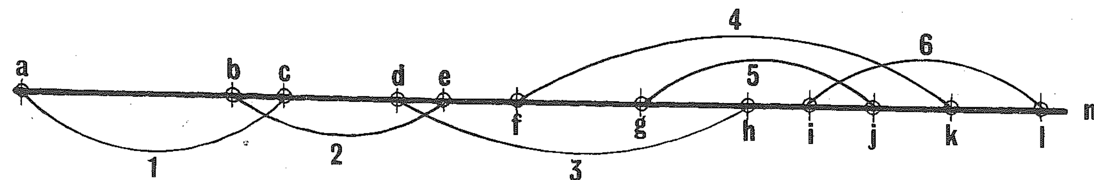


Fig. 4. — *Segments portés sur une droite et délimitant la tessiture des instruments.*

Fig. 5. — *Reproduction partielle du programme Algom 7*

```
EXPL. N:   2 DU 19.12.68              BARBAUD ALGOM7  C1011100

IDEN.   BARBAUD,ALGOM7,  C1011100,10000,0,1,1,T8
                 HEURE...     1751
ALG
        'DEBUT''REEL'A,B,C,D,E,F,G,H,I,J,K,L,M,N,O,P,Q,R,S,T,U,V,W,
        X,Y,Z,FA,QA,RA,N1,N2,TM,TK,TZ,DJ,DK,FR,R1,R2,R3,KZ   0
        'TAB'LIM$(1:40)$,
        OCT0,OCT1,OCT2,OCT3,OCT4,OCT5,OCT6,OCT7$(0:35)$,
        OCT8,OCT9,OCT10,OCT11$(0:35)$,
             POL$(1:20,0:23)$,
        RYTH$(1:9)$,
        PRO$(0:3)$,
        REP$(1:20)$,
        SY1$(1:20,0:35)$,SY2$(1:20,0:47)$,SY3$(1:20,0:59)$0

        'DEBUT'
        'PRO'VERONIQUE0'DEB'N1:=DONNEE0N2:=DONNEE0
             TM:=DONNEE0TK:=DONNEE0
             DJ:=DONNEE0
             'POU'M:=0'PAS'1'JUS'3'FAI'PRO$(M)$:=DONNEE0
             'POU'M:=1'PAS'1'JUS'9'FAI'RYTH$(M)$:=DONNEE0
             'POU'M:=1'PAS'1'JUS'20'FAI'REP$(M)$:=DONNEE0
             FR:=10
        'POU'M:=1'PAS'1'JUS'2*TM'FAI'LIM$(M)$:=DONNEE0
             'POU'M:=0'PAS'1'JUS'35'FAI'OCT0$(M)$:=DONNEE0
             'POU'M:=0'PAS'1'JUS'35'FAI'OCT1$(M)$:=DONNEE0
             'POU'M:=0'PAS'1'JUS'35'FAI'OCT2$(M)$:=DONNEE0
             'POU'M:=0'PAS'1'JUS'35'FAI'OCT3$(M)$:=DONNEE0
             'POU'M:=0'PAS'1'JUS'35'FAI'OCT4$(M)$:=DONNEE0
             'POU'M:=0'PAS'1'JUS'35'FAI'OCT5$(M)$:=DONNEE0
             'POU'M:=0'PAS'1'JUS'35'FAI'OCT6$(M)$:=DONNEE0
             'POU'M:=0'PAS'1'JUS'35'FAI'OCT7$(M)$:=DONNEE0
             'POU'M:=0'PAS'1'JUS'35'FAI'OCT8$(M)$:=DONNEE0
             'POU'M:=0'PAS'1'JUS'35'FAI'OCT9$(M)$:=DONNEE0
             'POU'M:=0'PAS'1'JUS'35'FAI'OCT10$(M)$:=DONNEE0
             'POU'M:=0'PAS'1'JUS'35'FAI'OCT11$(M)$:=DONNEE0
             'FIN'0

        VERONIQUE0

        'FIN'0


        ITER:'DEB''REE''TAB'S1,S2,S3,S4,S5$(0:11)$0

        'PRO'MADELEINE0'DEB''REE'QM0
             'POU'M:=0'PAS'1'JUS'11'FAI''DEB'S1$(M)$:=S2$(M)$:=
             S3$(M)$:=S4$(M)$:=S5$(M)$:=M0'FIN'0
             M:=N:=00
             R:=(N1+N2)/1000R:=R-ENT(R)0
        EXP:  FA:=N1+N20'SI'FA>9973'ALO'FA:=FA-99730N1:=N20N2:=FA0
             QA:=ENT(FA/1000)0RA:=FA-QA*10000
        AAA: 'ALL''SI'DK=1'ALO'AAAA'SINON''SI'DK=2'ALO'AAAB'SINON'AAAC0
        AAAA:X:='SI'R<PRO$(0)$'ALO'OCT0$(N)$'SINON'
             'SI'R<PRO$(1)$'ALO'OCT1$(N)$'SINON'
             'SI'R<PRO$(2)$'ALO'OCT2$(N)$'SINON'OCT3$(N)$0
             'ALL'AAAD0
        AAAB:X:='SI'R<PRO$(0)$'ALO'OCT4$(N)$'SINON'
             'SI'R<PRO$(1)$'ALO'OCT5$(N)$'SINON'
             'SI'R<PRO$(2)$'ALO'OCT6$(N)$'SINON'OCT7$(N)$0
             'ALL'AAAD0
        AAAC:X:='SI'R<PRO$(0)$'ALO'OCT8$(N)$'SINON'
             'SI'R<PRO$(1)$'ALO'OCT9$(N)$'SINON'
             'SI'R<PRO$(2)$'ALO'OCT10$(N)$'SINON'OCT11$(N)$0
        AAAD: A:=ENT(X/1000)0B:=X-A*10000
             'SI'B<RA'ALO''DEB'N:=N+10'ALL'AAA0'FIN''SINON''ALL'AAB0
        AAB:  'ALL''SI'DK=1'ALO'AABA'SINON''SI'DK=2'ALO'AABB
             'SINON'AABC0
        AABA:A:=ENT(X/100000)0B:=X-A*1000000
             C:=ENT(B/10000)0D:=B-C*100000
             E:=ENT(D/1000)0
             A:=A*120C:=C*120E:=E*120
             B:=S1$(M)$0D:=S2$(M)$0F:=S3$(M)$0
             S1$(M)$:=A+B0S2$(M)$:=C+D0S3$(M)$:=E+F0'ALL'PROG0
        AABB:A:=ENT(X/1000000)0B:=X-A*10000000
              C:=ENT(B/100000)0D:=B-C*1000000
             E:=ENT(D/10000)0F:=D-E*100000
             G:=ENT(F/1000)0
             A:=A*120C:=C*120E:=E*120G:=G*120
             B:=S1$(M)$0D:=S2$(M)$0F:=S3$(M)$0H:=S4$(M)$0
             S1$(M)$:=A+B0S2$(M)$:=C+D0S3$(M)$:=E+F0S4$(M)$:=G+H0
             'ALL'PROG0
        AABC:A:=ENT(X/10000000)0B:=X-A*100000000
             C:=ENT(B/1000000)0D:=B-C*10000000
             E:=ENT(D/100000)0F:=D-E*1000000
             G:=ENT(F/10000)0H:=F-G*100000
             I:=ENT(H/1000)0
             A:=A*120C:=C*120E:=E*120G:=G*120I:=I*120
             B:=S1$(M)$0D:=S2$(M)$0F:=S3$(M)$0H:=S4$(M)$0J:=S5$(M)$0
             S1$(M)$:=A+B0S2$(M)$:=C+D0S3$(M)$:=E+F0S4$(M)$:=G+H0
             S5$(M)$:=I+J0
        PROG:M:=M+10N:=00'ALL''SI'M=12'ALO'ENDE'SINON'EXP0
        ENDE:L:=10
             'ALL''SI'DK=1'ALO'AACA'SINON''SI'DK=2'ALO'AACB'SINON'AACC0
        AACA:'POU'K:=0'PAS'1'JUS'35'FAI'SY1$(L,K)$:=960L:=L+10
             'ALL''SI'L<=TM'ALO'AACA'SINON'SCHLUSS0
        AACB:'POU'K:=0'PAS'1'JUS'47'FAI'SY2$(L,K)$:=960L:=L+10
             'ALL''SI'L<=TM'ALO'AACB'SINON'SCHLUSS0
        AACC:'POU'K:=0'PAS'1'JUS'59'FAI'SY3$(L,K)$:=960L:=L+10
             'SI'L<=TM'ALO''ALL'AACC0
        SCHLUSS :'FIN'0

        'PRO'MARIE THERESE(S1)0'TAB'S10'DEB'
             M:=S:=00Z:=-10N:=10
        FIB:  FA:=N1+N20'SI'FA>9973'ALO'FA:=FA-99730
             N1:=N20N2:=FA0
             I:=10
             V:=(FA/100)-ENT(FA/100)0
             QA:=ENT(FA/2)0RA:=FA-QA*20
             W:='SI'RA=0'ALO'-1'SINON'10
        FIB2:D:=REP$(I)$0
             'SI'V<D'ALO''ALL'AAA'SINON'
             'DEB'I:=I+10'ALL'FIB20'FIN'0
        AAA: A:=LIM$(2*I-1)$0B:=LIM$(2*I)$0
        AAB: X:=S1$(M)$0
             'SI'X≠96'ALO''ALL'AAAB0
             M:=M+10
                  S:=S+10'SI'S=12'ALO''ALL'ENDE0
             'SI'M=12'ALO'M:=00'ALL'AAB0
        AAAB:'ALL''SI'A<=X'ALO'AABB'SINON'PRMI0
        AABB:'SI'X<=B'ALO''ALL'AAC0
        PRMI:S:=00
             I:=I+W0N:=N+10
             'SI'I<1'ALO'I:=I+TM0
             'SI'I>TM'ALO'I:=I-TM0
             'ALL'AAA0
        AAC:  'ALL''SI'DK=1'ALO'BAA'SINON'
                  'SI'DK=2'ALO'BAB'SINON'BAC0
        BAA:  SY1$(I,G-1)$:=X0'ALL'BBD0
        BAB:  SY2$(I,G-1)$:=X0'ALL'BBD0
        BAC:  SY3$(I,G-1)$:=X0
        BBD: Z:=Z+10'SI'Z=12'ALO''ALL'ENDE0
             S1$(M)$:=960G:=G+10S:=00'ALL'FIB0
        ENDE:'FIN'0

        'PRO'TRAUTI0'DEB''BOO'B0,B1,B20L:=10K:=N:=00
        ORG: 'ALL''SI'DK=1'ALO'ORG1'SINON''SI'DK=2'ALO'ORG2'SINON'ORG30
        ORG1:A:=SY1$(L,K)$0B:=SY1$(L,K+1)$0'ALL'COND0
        ORG2:A:=SY2$(L,K)$0B:=SY2$(L,K+1)$0'ALL'COND0
        ORG3:A:=SY3$(L,K)$0B:=SY3$(L,K+1)$0
        COND: B0:=A=960B1:=B=960
             B2:=B0'ET'B10
        AAD: 'SI'B2'ALO''DEB'K:=K+20'ALL'DISP0'FIN''SINON''ALL'AAE0
        AAE: 'ALL''SI'B0'ET''NON'B1'ALO'AABA
             'SINON''SI'B1'ET''NON'B0'ALO'AABB'SINON'AABC0
        AABA:'SI'N>23'ALO''ALL'VERNICHTUNG
             'SINON''DEB'POL$(L,N)$:=B0'ALL'PROK0'FIN'0
        AABB:'SI'N>23'ALO''ALL'VERNICHTUNG
             'SINON''DEB'POL$(L,N)$:=A0'ALL'PROK0'FIN'0
        AABC:'SI'N>22'ALO''ALL'VERNICHTUNG
             'SINON''DEB'POL$(L,N)$:=A0POL$(L,N+1)$:=B0
             K:=K+20N:=N+20'ALL'DISP0'FIN'0
        VERNICHTUNG:FR:=00'ALL'ENDE0
        PROK:K:=K+20N:=N+10
        DISP:'ALL''SI'DK=1'ALO'AAA'SINON''SI'DK=2'ALO'AAB'SINON'AAC0
        AAA:'ALL''SI'K>34'ALO'PROL'SINON'ORG0
        AAB: 'ALL''SI'K>46'ALO'PROL'SINON'ORG0
        AAC: 'ALL''SI'K>58'ALO'PROL'SINON'ORG0
        PROL:'POU'M:=N'PAS'1'JUS'23'FAI'POL$(L,M)$:=960
             L:=L+10'SI'L>TM'ALO''ALL'ENDE'SINON''DEB'
             K:=00N:=00'ALL'ORG0'FIN'0ENDE:'FIN'0

        'PRO'JACQUELINE0'DEBUT'L:=10A:=2830
        AAA: 'POU'K:=0'PAS'1'JUS'23'FAI''DEB'
        EXP:  FA:=N1+N20'SI'FA>9973'ALO'FA:=FA-99730N1:=N20N2:=FA0
             QA:=ENT(FA/24)0RA:=FA-QA*240X:=POL$(L,K)$0
             Y:=POL$(L,RA)$0
             POL$(L,RA)$:=X0POL$(L,K)$:=Y0'FIN'0
             L:=L+10'ALL''SI'L>TM'ALO'ENDE'SINON'AAA0
        ENDE:'FIN'0

        'PRO'LAURENCE0'DEB'L:=10K:=00
        FIB: FA:=N1+N20'SI'FA>9973'ALO'FA:=FA-99730
             N1:=N20N2:=FA0
             QA:=ENT(FA/100)0RA:=FA-QA*1000
             'SI'RA<TK'ALO''ALL'PROK0
        AAA: A:=POL$(L,K)$0B:=POL$(L,K+1)$0
             'SI'A=96'ALO''DEB'K:=K+10'ALL'TEST0'FIN''SINON''ALL'AAB0
        TEST:'SI'K>=23'ALO''ALL'PROL'SINON''ALL'FIB0
        AAB: 'SI'B≠96'ALO''ALL'PROK0
             POL$(L,K+1)$:=A0
        PROK:K:=K+10'SI'K<23'ALO''ALL'FIB0
        PROL:K:=00L:=L+10
             'ALL''SI'L>TM'ALO'ENDE'SINON'FIB0
        ENDE:'FIN'0

        'PRO'BRIGITTE0'DEB'L:=10
        AAA: 'POU'K:=0'PAS'1'JUS'23'FAI''DEB'
             'SI'POL$(L,K)$=96'ALO'POL$(L,K)$:=800
             'SINON''DEB'A:=POL$(L,K)$0B:=ENT(A/12)0C:=A-B*120
             B:=B*1000A:=B+C0POL$(L,K)$:=A0'FIN'0'FIN'0
             L:=L+10'SI'L<=TM'ALO''ALL'AAA0'FIN'0

        'PRO'NADINE0'DEB'
             K:=00T:=10
        AAA:  FA:=N1+N20'SI'FA>9973'ALO'FA:=FA-99730
             N1:=N20N2:=FA0
             R:=(FA/100)-ENT(FA/100)0
             S:='SI'R<RYTH$(1)$'ALO'0,1'SINON'
             'SI'R<RYTH$(2)$'ALO'0.2'SINON'0.30
             Z:=00
        AAB:  'POU'M:=1'PAS'1'JUS'TM'FAI''DEB'
             A:=POL$(M,K+Z)$0A:=A*S0POL$(M,K+Z)$:=A0'FIN'0
             T:=T+10
             'ALL''SI'T=2'ALO'AAC'SINON'
             'SI'T=3'ALO'AAD'SINON'PROG0
        AAC:  FA:=N1+N20'SI'FA>9973'ALO'FA:=FA-99730
             N1:=N20N2:=FA0
             R:=(FA/100)-ENT(FA/100)0
             S:='SI'R<RYTH$(4)$'ALO'0'SINON''SI'R<RYTH$(5)$'ALO'0.1
             'SINON'0.20Z:=10'ALL'AAB0
        AAD:  FA:=N1+N20'SI'FA>9973'ALO'FA:=FA-99730
             N1:=N20N2:=FA0
             R:=(FA/100)-ENT(FA/100)0
             S:='SI'R<RYTH$(7)$'ALO'0,1'SINON'
             'SI'R<RYTH$(8)$'ALO'0.2'SINON'0.30Z:=40'ALL'AAB0
        PROG:K:=K+80T:=10
             'ALL''SI'K=24'ALO'ENDE'SINON'AAA0
        ENDE:'FIN'0
```

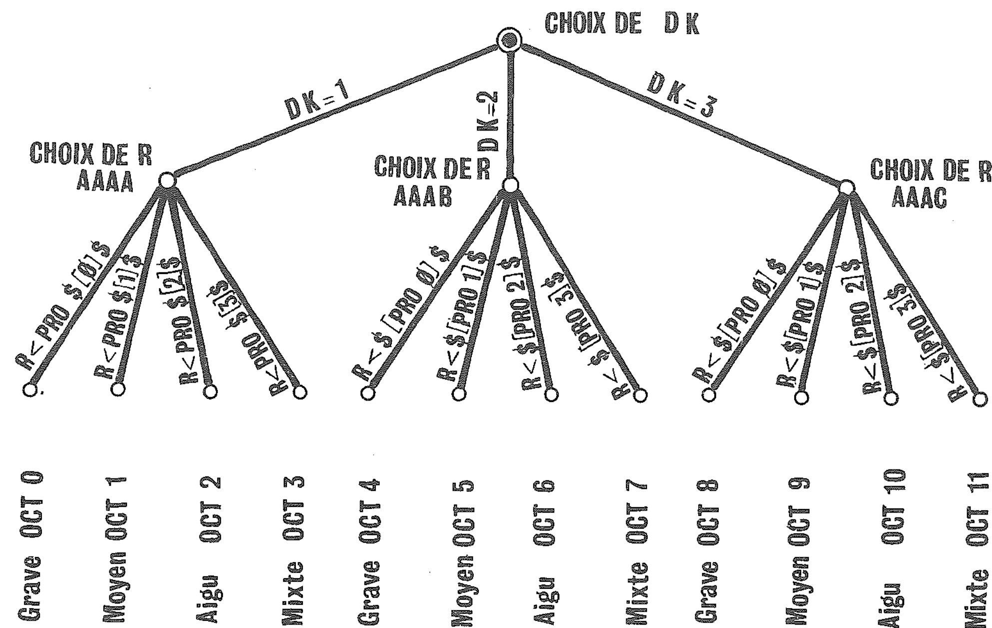


Fig. 6. — *Choix des listes OCT O à OCT 11 (fonctions de répartition des sons du grave à l'aigu).*

indiquent la valeur de la fonction de répartition, de o à 999. Par exemple

$$\frac{125384}{126532}$$

donne à la combinaison d'octaves 1, 2 et 5 (125) la probabilité 0,148 de se produire, probabilité obtenue par la soustraction 532 — 384 = 148.

Les listes OCT4 à OCT7 sont composées de la même façon, pour les arrangements de 7 objets 4 à 4, également au nombre de 35. Les listes OCT8 à OCT11 comportent 21 nombres de 8 chiffres (7 objets 5 à 5).

En AAAD, la valeur de RA indique quelle combinaison est choisie. En AABA, AABB et AABC, les octaves choisies sont ajoutées aux nombres des listes S1 à S5, au rang M. Après le nombre d'itérations nécessaires (étiquette PROG), la fin de la procédure garnit les tableaux SY1, SY2 ou SY3 de silence, c'est-à-dire du nombre arbitraire 96.

Procédure MARIE-THÉRÈSE. L'identificateur G prend la valeur I avant l'appel de cette procédure. A chacune de ses itérations, G progresse d'une unité. La procédure MARIE-THÉRÈSE est appelée 3, 4 ou 5 fois, suivant que DK a l'une des valeurs 1, 2 ou 3 : elle emploie successivement les tableaux S1, S2, S3 (si DK = 1), puis le tableau S4 (si DK = 2), puis enfin le tableau S5 (si DK = 3). Les nombres pris dans les tableaux ainsi sélectionnés sont choisis dans l'ordre où ils se trouvent et répartis dans les colonnes de SY1, SY2 ou SY3 en fonction des critères suivants :

1. Le tableau REP $ (1 : 20) $ est une fonction de répartition des sons suivant les TM Timbres choisis : elle est lue dans les données au cours de la procédure VÉRONIQUE.

2. Le tableau LIM $ (1 : 40) $ indique les limites supérieure et inférieure de la tessiture des instruments choisis. Il se compose donc de 2 × TM nombres.

Procédure TRAUTI. Les 36 nombres du tableau SY1, les 48 nombres du tableau SY2 ou les 60 nombres de SY3 sont répartis à raison d'un nombre par ligne. Si l'on considère maintenant deux positions successives dans une même colonne de ces tableaux, 4 cas peuvent se présenter :

1. Les deux positions sont occupées par le nombre 96 (silence).

2. La première position est occupée par un son et non la seconde.

3. La seconde position est occupée par un son et non la première.

4. Les deux positions sont occupées par des sons.

Seuls les sons seront transférés dans le tableau POL $ (1 : 20, 0 : 23) $ à la suite l'un de l'autre, dans chaque colonne. Lorsque les sons d'une colonne sont tous transférés, les positions suivantes sont remplies par le nombre 96.

Procédure JACQUELINE. Dans chaque colonne de POL, les sons et les silences sont permutés aléatoirement.

Procédure LAURENCE. Avant l'appel de cette procédure, son exécution éventuelle est soumise à l'influence de la donnée TK; plus TK est grand, plus grande est la chance que la procédure soit exécutée; si TK est égal ou inférieur à 10, elle n'est jamais exécutée.

Le but de cette procédure est de prolonger éventuellement les sons dans les positions qui suivent celles où ils sont notés dans le cas où elles sont occupées par le nombre 96. Cette décision dépend uniquement de la valeur de TK.

Procédure BRIGITTE. Elle convertit en base 12 les nombres de POL jusqu'alors exprimés en base 10.

Procédures NADINE et WILU. Ces procédures sont destinées à établir les rythmes. Avant la procédure NADINE, les tableaux sont garnis de nombres de trois chiffres indiquant soit des fréquences, soit des silences, par exemple 308, 410, etc. La procédure NADINE ajoute .1 .2 ou .3 à ces nombres; ainsi les exemples 308 et 410 pourront devenir 308.1 et 410.2. Les nombres sont ensuite répartis aléatoirement dans les tableaux en les séparant éventuellement par des nombres auxquels est ajouté .0, ce qui donne la notation des durées expliquée précédemment : on obtient un rapport qui peut être par exemple un dans une unité, ou trois dans deux unités, etc... le premier chiffre établi, un ou deux, déterminant le nombre d'unités, et le nombre de .0 établissant le rapport. Après l'appel des procédures, l'unité est fixée, au moyen de la variable aléatoire, à une blanche ou à une noire.

Procédure CHRISTIANE. Cette procédure indique au moyen de la variable aléatoire RA, les intensités notées de 0 à 9; (de PPPP à FFFF). Pour cela RA, compris entre 0.00 et 0.09, est rajouté à chaque nombre du tableau POL. On obtient une suite de nombres du type suivant : 304.16 200.01 110.23 etc.., où la seconde décimale désigne l'intensité.

Procédure ELSA. Cette procédure a pour but l'impression des nombres contenus dans le tableau POL.

La description des procédures est suivie de leur appel pour la réalisation.

c) Données

Dans les données du programme Algom 7 sont incluses des fonctions de répartition dont le rôle a été précisé dans l'analyse du programme : PRO dans la procédure MADELEINE, et REP $ (1 : 20) $ dans la procédure MARIE-THÉRÈSE. Ces fonctions sont introduites dans les données sous forme de tableau cumulatif (Fig. 7).

Le principe de la fonction intégrale est celui de la cumulation (jusqu'à l'unité dans le cas des fonctions aléatoires).

Ainsi, dans CREDOC, ont été utilisées arbitrairement des fonctions de répartition correspondant à des courbes publiées par le C.R.E.D.O.C., concernant la consommation de certaines denrées en France.

(a)	0,10	0,25	0,4	0,11	0,40	0,10	$y = p[x_i]$
(b)	0,10	0,35	0,39	0,50	0,90	1	$F[x] = \sum_{i=1}^{\infty} p[x_i]$

Fig. 7. — *Exemple d'établissement d'un tableau cumulatif (b).*

Avec le programme ALGOM 7, Pierre Barbaud a réalisé les œuvres suivantes :

Cogitationes symbolicæ I
Cogitationes symbolicæ II
Cogitationes symbolicæ II *bis*, I
Credoc
Musiques de film : Les Créatures (Varda)
Les pâtres du désordre (Papatakis)

Pierre Barbaud réalise actuellement un nouveau programme intitulé PANAREA, car l'idée de base a été conçue par le compositeur l'été dernier dans l'Ile de Panarea, au cours d'improvisations musicales collectives dont l'idée revient à Girolamo Arrigo. Ce programme est destiné à sortir de l'univers de la gamme chromatique et du tempérament; il utilise donc des fréquences qui n'appartiennent pas à cet univers.

Une première version sera destinée à huit instruments et comprendra 50 fréquences différentes mesurées en hertz, ou 50 sons différents, de hauteurs non mesurées. A chaque instrument est confié un certain nombre de sons.

Une visite chez Bull General electric

Pierre Barbaud devait ce jour-là faire calculer un de ses programmes par un ordinateur B. GE. Ceci nous permit de suivre les différentes phases de l'opération.

Le compositeur s'occupe du « software », c'est-à-dire du travail de conception et de programmation. La manipulation du « hardware » c'est-à-dire de la machine elle-même est effectuée par les spécialistes de la Bull General Electric.

Le programme, rédigé en ALGOL et destiné à la simulation de l'harmonie classique, avait déjà été confié au service de perforation et se trouvait donc mis sous forme de cartes perforées. Toutefois, Pierre Barbaud désirait modifier un tableau de probabilités. Il dût donc remplacer quelques cartes,



et perfora lui-même les nouvelles données au moyen d'un appareil manuel (Fig. 8).

Les cartes perforées étant prêtes, furent introduites dans la machine. Le compilateur ALGOL mis en service, le programme fut enregistré sur bande (Fig. 9).

A la sortie, le programme fut imprimé en premier, puis les données et enfin les résultats qui ont été calculés en moins de 45 secondes (Fig. 10).

L'opération complète, depuis l'introduction des cartes perforées jusqu'à l'obtention des résultats, n'a pas duré plus de 1 minute. Il ne restait plus au compositeur qu'à décoder la sortie obtenue pour avoir une partition musicale.

C'était une parfaite démonstration des possibilités immenses offertes par les ordinateurs et en même temps un rappel : cette technique si perfectionnée est un instrument de travail riche de possibilités, dont le compositeur dispose; il n'a de valeur dans l'univers de la musique, que s'il est mis au service d'idées claires et aptes à engendrer des résultats musicaux intéressants. L'intelligence et les facultés créatrices du compositeur sont indispensables à la conception d'une idée directrice qui, exprimée dans le programme, guidera le travail de l'ordinateur. C'est le grand mérite des initiateurs de la composition musicale automatique d'avoir su ouvrir à la musique un nouveau domaine en mettant à son service la dernière née des techniques contemporaines.

Fig. 8. — *Perforation des cartes à la main.*

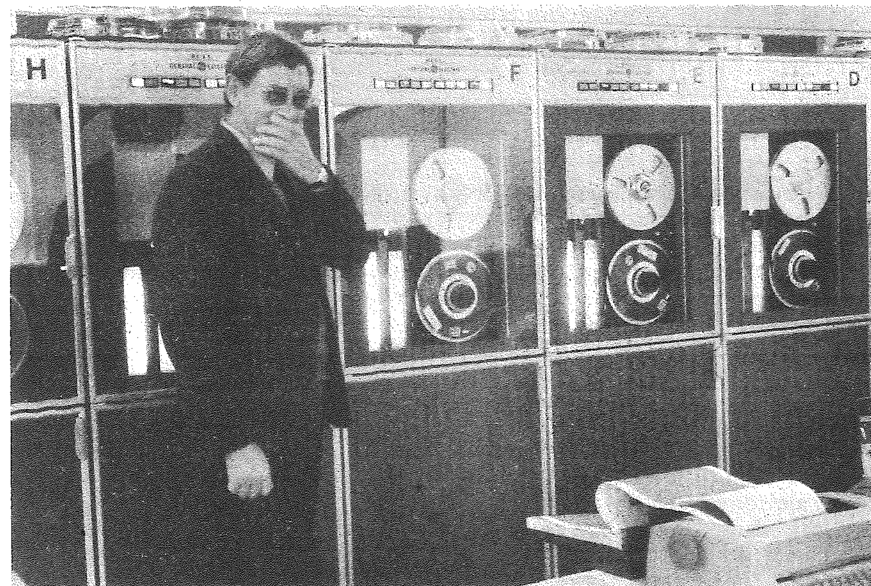


Fig. 9. — *Enregistrement sur bande du programme.*

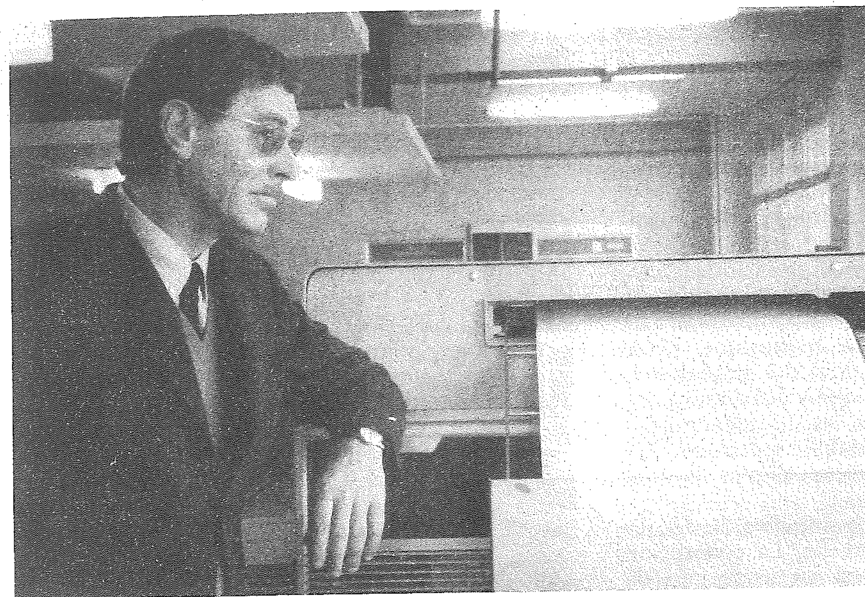


Fig. 10. — *Attente des résultats à la sortie de l'imprimante.*

CHAPITRE IV

IANNIS XENAKIS ET LA MUSIQUE STOCHASTIQUE

« Au service de la musique comme dans toute activité humaine créatrice, la pensée scientifique et mathématique doit s'amalgamer directement à l'intuition. »

« Je pourrai proposer ce qui, à mon sens, couvre le terme musique :

1. D'abord une sorte de comportement nécessaire pour celui qui la pense et la fait.
2. Un plerôme individuel, un accomplissement.
3. Une fixation sonore de virtualités imaginées (thèses cosmologiques, philosophiques...).
4. Elle est normative, c'est-à-dire qu'elle constitue un modèle d'être ou de faire par entraînement sympathique, inconsciemment.
5. Elle est catalytique : sa présence seule permet des transformations internes psychiques ou de la pensée au même titre que la boule de cristal de l'hypnotiseur.
6. Elle est un jeu gratuit d'enfant.
7. Elle est une ascèse mystique (mais athée). Par conséquent les expressions de tristesse, de joie, d'amour, de situations ne sont que des cas particuliers bien limités »[1].

Ainsi s'exprime Iannis Xenakis, dont la démarche a pris, dans le domaine de la composition musicale, une importance et une influence grandissantes. Pour situer mieux cette démarche, et avant d'essayer de la définir, quelques mots sur l'homme lui-même sont nécessaires.

L'homme et ses conceptions

Compositeur, architecte et chercheur, Iannis Xenakis obtint à Athènes un diplôme d'ingénieur à l'École Polytechnique; il commença ses études musicales en Grèce. Après avoir été grièvement blessé en participant à la résistance contre les nazis, il vint en 1947 à Paris, où il suivit au Conservatoire de musique la célèbre classe d'esthétique musicale d'Olivier Messiaen. Puis il collabora avec Le Corbusier, menant parallèlement les recherches architecturales et les recherches musicales. Il élargit l'optique de compositeur en découvrant des idées directrices communes aux deux disciplines; un exemple de correspondance entre musique et architecture : pour Metastasis, œuvre charnière dans laquelle s'esquisse sa nouvelle conception musicale,

1. Vers une métamusique. La nef n° 29 Tendances, lettres, arts, janvier-mars 1967, p. 118. Tallandier éditeur, 7, rue Rémy-Dumoncel, Paris-14e.

Xenakis a établi un graphe des glissandi des cordes, la trajectoire de chaque glissando étant représentée par une droite établie en fonction de sa durée et de son étendue dans le champ des hauteurs. C'est de ce graphe qu'il s'inspirera pour créer les plans du pavillon Philips pour l'exposition de Bruxelles en 1958.

Formation d'ingénieur, d'architecte et de musicien, connaissance de la philosophie de la Grèce antique, sensibilité aiguë, goût de l'abstraction, ouverture et curiosité d'esprit, ainsi se forme une personnalité exceptionnelle, ainsi se prépare une conception révolutionnaire de la musique, basée sur les lois universelles du calcul des Probabilités et de la Logique. C'est la musique « Stochastique », du grec Stochos, but, cible, la loi des grands nombres employée par Xenakis spécifiant que plus les phénomènes sont nombreux, plus ils vont vers un but déterminé.

Il est toujours intéressant et singulier de découvrir la genèse d'une idée nouvelle. La conception stochastique de la musique est en partie née de l'intensité auditive d'un souvenir : Athènes, une manifestation anti-nazi, des milliers de personnes scandant un slogan, qui se propage comme un rythme gigantesque; puis le heurt avec l'ennemi; le rythme éclate en un chaos énorme de cris ponctués des sifflements des balles et des crépitements de mitrailleuses. Et petit à petit le silence retombe sur la ville. Détachés de tout autre contexte et considérés uniquement sous l'angle auditif, ces événements sonores sont tissés d'un grand nombre de sons individuels, qui ne sont pas perceptibles isolément, mais dont la réunion forme un nouveau fait sonore perçu globalement. C'est le cas aussi du chant des cigales ou du bruit de la pluie. Les lois statistiques de ces événements sont des « lois du passage de l'ordre parfait au désordre total d'une manière continue ou explosive. Ce sont des lois stochastiques »[1].

Musique et calcul des Probabilités

En introduisant pour la première fois le calcul des Probabilités dans la musique, Iannis Xenakis apportait des innovations sur le plan de la conception abstraite, mais également sur le plan de la réalisation concrète de la musique. Pour obtenir les effets de masse décrits précédemment, il fallait une nouvelle utilisation des moyens de produire



Iannis Xenakis

les sons : dans son orchestration, le compositeur divise les cordes, chaque instrumentiste suivant sa trajectoire individuelle et le total de ces trajectoires constituant l'effet de masse perçu par l'auditeur. C'est un univers de nuages de sons, d'espaces sonores en évolution continue, que l'on perçoit comme une matière sonore lisse ou granuleuse, animée d'un perpétuel changement interne.

Cet univers est régi par des lois de probabilités (loi de Poisson, loi de Laplace-Gauss), qui contrôlent les caractéristiques traditionnelles des sons, durées, intensités, timbres, hauteurs, mais aussi de nouvelles caractéristiques du fait musical : densité des nuages de sons, vitesse des glissandi, degré d'ordre. En contrôlant l'évolution de grandes masses sonores, ces lois permettent de diriger des transformations continues, celles par exemple, d'un ensemble de sons pincés à un ensemble de sons arco, celle de l'ordre au désordre, ou vice-versa, etc...

Comment sont utilisées les lois stochastiques? Le temps est considéré comme une ligne droite, sur laquelle des points viennent s'inscrire, marquant les variations des composantes. Quelle est la densité linéaire moyenne des points répartis au hasard sur une longueur donnée de la droite temps? Ceci étant établi, si l'on prend sur la droite temps un segment OA de longueur croissant indéfiniment, la densité linéaire de points sur ce segment restant constante, la probabilité d'occurrence à l'intérieur d'OA d'un segment de longueur dx est régie par une loi qui peut être soit une loi du hasard, soit une loi de distribution quelconque, et qui conditionnera l'occurrence des différentes durées (segments). La formule utilisée par Iannis Xenakis est $P(dx) = e^{-cx} . c . dx$.

A l'intérieur d'une durée donnée, un nuage de sons ponctuels dont la densité moyenne est connue, défini dans un espace intensité-hauteur, sera régi par la loi de Poisson (loi d'apparition des événements rares au hasard), qui permettra d'établir la probabilité d'avoir telle densité de sons dans telle région de l'espace intensité-hauteur.

Pour les variables fréquences, intensités, etc..., chaque événement forme avec celui qui le précède un intervalle; un segment de longueur z entre deux points sur l'axe de la variable intéressée, cet axe étant limité par une borne inférieure A et une borne supérieure B, représente l'intervalle. Une loi de probabilité permet de tirer au hasard un segment de longueur z intérieur à AB.

Pour les glissandi (uniformément continus), le son glissé étant assimilé à la notion mathématique de vitesse, trois hypothèses d'homogénéité sont retenues :

1° La densité des sons mobiles (glissandi) est égale dans toute l'étendue du spectre de fréquences.

2° La vitesse moyenne des glissandi (ascendants ou descendants) est la même dans les différents registres.

3° Dans tout le registre, les glissandi ascendants et descendants sont en nombre égal (isotropie).

Un glissando vers l'aigu peut être défini comme étant positif, vers le grave, comme étant négatif.

A partir des trois hypothèses énumérées, Iannis Xenakis définit une fonction f (v) qui donne la probabilité d'occurrence de la vitesse v, d'après un raisonnement tiré de la théorie cinétique des gaz de Maxwell et Boltzmann. Cette méthode a été employée pour la première fois dans Pithoprakta, œuvre pour orchestre à cordes (1955-56).

Cette utilisation de la théorie et du calcul des probabilités permet donc de contrôler les transformations continues de grands ensembles de sons au moyen des écarts et des moyennes, une transformation pouvant être brutale si les écarts de la moyenne deviennent exceptionnels. On peut aussi obtenir la confrontation d'événements sonores très improbables avec des événements sonores moyens, et contrôler des atmosphères dans lesquelles les événements sonores sont raréfiés. Les lois du calcul des probabilités régissent celles de « l'apparition de l'être et de son devenir ».

Construction d'une œuvre

Les phases fondamentales de la construction d'une œuvre musicale, une fois établies les conceptions de base et choisie la nature des « êtres sonores » employés et leur notation, peuvent se résumer ainsi :

a) macrocomposition : définition des transformations que les êtres sonores subiront et ordonnance de ces transformations dans le temps (succession ou simultanéité);

b) microcomposition (choix, puis fixation détaillée de la « nature des relations fonctionnelles ou stochastiques » des êtres sonores);

c) description séquentielle des points établis en *a* et *b,* établissement d'un schéma de l'œuvre.

d) réalisation des calculs, vérifications et modifications définitives du programme séquentiel;

e) résultat final (partition de musique exprimée en notation traditionnelle, numérique, graphique ou autres);

f) « Incarnation sonore » du programme avec exécution orchestrale directe, manipulations des êtres sonores pour enregistrement sur bande magnétique (musique électro-acoustique), ou fabrication mécanique des sons (synthétiseur de sons).

Cette énumération appelle quelques remarques :

1° Les phases *d* et *e* peuvent être effectuées par des ordinateurs. L'intérêt de leur emploi est ici évident, vu la complexité des calculs impliqués. La phase f pourrait aussi être assumée par un ordinateur, s'il est du type convertisseur digital-analogique qui permet d'obtenir directement des sons réalisés.

2° Il est à noter que Iannis Xenakis distingue dans les structures musicales différents niveaux temporels. La catégorie « hors-temps » est composée des structures abstraites qui existent en elles-mêmes, dans leur généralité, par exemple les lois de probabilités; dans le processus de composition décrit précédemment, paragraphe *b,* le choix du type des relations stochastiques ou fonctionnelles entre les êtres sonores fait appel à la catégorie « hors temps ». A la catégorie « en temps » correspond l'inscription sur la « droite-temps » des structures abstraites choisies; la structure abstraite intemporelle est alors placée dans le temps. Enfin la catégorie temporelle correspond à la réalisation effective des événements sonores, selon le plan établi.

Thèse du minimum des règles de composition

L'utilisation des lois du hasard met à jour une question fondamentale : quel est le minimum de

1. Musiques formelles, p. 19. La Revue Musicale. Double numéro spécial 253 et 254. Éditions Richard Massé. Paris, 1963.

contraintes logiques, c'est-à-dire de règles de composition, nécessaire pour la fabrication d'une œuvre musicale ? Cette question est l'idée de base qui a engendré toute une famille d'œuvres, écrites par Xenakis en utilisant la thèse du minimum de règles de composition. L'ancêtre de cette famille d'œuvres est Achorripsis, pour 21 instruments, composée en 1956-7 ; les calculs d'Achorripsis étaient entièrement faits à la main. Quatre ans plus tard, un programme, établi d'après la thèse qui engendra Achorripsis, fut calculé par l'ordinateur IBM 7090, et la première née d'une famille d'œuvres issues de ce programme, ST/10-1, 080262, fut créée au siège d'IBM - France le 24 mai 1962 sous la direction du chef d'orchestre Constantin Simonovic.

Mais avant d'étudier la mécanisation de la thèse du minimum de règles de composition, il convient d'examiner le principe lui-même et son application.

On peut représenter les êtres sonores de l'orchestre classique par un vecteur à quatre variables Er (c, h, g, u,) ces quatre variables correspondant aux quatre paramètres traditionnels du son, timbre, hauteur, intensité et durée. Le vecteur Er définit un point M qui aura comme coordonnées les nombres c_a, h_i, g_j, U_k. On peut ordonner ces points M sur un axe orienté, l'axe des Er, et tracer, par l'origine de l'axe Er, un autre axe orienté, l'axe temps sur lequel seront représentés les points M dans leur succession temporelle. Dans l'espace à deux dimensions ainsi obtenu, les points M peuvent apparaître sans autre nécessité que celle d'obéir à une loi aléatoire, ce qui équivaut à admettre une répartition au hasard des événements Er dans l'espace (Er, t). Si la densité superficielle des événements est faible, la loi de Poisson peut être employée. L'œuvre musicale sera faite d'un fragment suffisamment long de cette répartition aléatoire des événements sonores.

« La loi de base définie plus haut engendre toute une famille d'œuvres en fonction de la densité superficielle. Nous avons donc bien un archétype formel d'œuvre dont le souci de base est d'atteindre la dissymétrie (au sens étymologique) la plus grande, le minimum de contraintes, de causalités, de règles. »

Que seront les événements sonores « rares » utilisés ? Ils peuvent être des sons isolés, des figures mélodiques, des nuages de sons dont les caractéristiques sont également régies par les lois du hasard.

Pour atteindre la dissymétrie, la symétrie est rompue par l'introduction, progressive ou brutale, d'événements exceptionnels qui, s'ils se généralisent, provoquent le passage au niveau du désordre. « Le hasard n'est qu'un état extrême de ce désordre contrôlé (...) et ne peut être créé sans soumission totale à ses propres lois. »

Le vecteur-matrice d'Achorripsis est constitué de 196 cases, réparties sur un espace à deux dimensions qui comprend pour les colonnes sept cases correspondant à 28 unités de temps ; si par exemple l'œuvre dure sept minutes, l'unité de temps U_t vaudra 15 secondes (Fig. 2).

La densité moyenne d'événements choisie étant de $\lambda = 0{,}60 \dfrac{\text{événements}}{\text{unité}}$ au moyen de la formule de Poisson, on obtient un tableau des probabilités de P_0 à P_5, dans lequel P_i est la probabilité pour que l'événement se produise i fois dans l'unité de temps.

Pour obtenir la répartition des fréquences dans les 196 cases, on multiplie les P_i (valeurs de P_0, P_1 etc...) par 196.

Pour répartir dans le vecteur-matrice d'Achorripsis les fréquences des événements zéro (P_0), simples (P_1), doubles (P_2), triples et quadruples, la distribution de Poisson doit être effective dans les colonnes et dans les lignes, afin que « le hasard baigne totalement l'espace sonore ».

Si l'on considère les 28 colonnes comme 28 cases, on y distribuera successivement les événements zéros, simples, doubles, triples et quadruples. Pour Achorripsis, on a calculé par la méthode indiquée ci-dessus que l'événement simple (probabilité P_1) doit se produire 65 fois dans les 196 cases. Dans les 28 colonnes (prises comme cases), la densité moyenne de l'événement simple sera :

$$\lambda = \frac{65}{28} = 2{,}32 \text{ par colonne.}$$

En appliquant la formule de Poisson avec cette densité moyenne, on obtient un tableau du nombre de colonnes ayant x événements simples (Fig. 1).

La même opération sera effectuée pour les lignes.

Pour le vecteur-matrice, le compositeur dispose à l'origine, du choix arbitraire de trois variables : la loi de Poisson, la moyenne δ (densité superficielle), et le nombre de lignes et colonnes.

Après avoir réglé les fréquences d'occurrence de l'événement unitaire, il faut préciser cet événement lui-même.

L'événement simple choisi est un nuage de sons ; sa densité linéaire δ est de 5 sons par mesure 26 MM (métronome Maëlzel), soit $\delta = 2{,}2$ sons par seconde et 32,5 sons par cases.

Sur le vecteur-matrice d'Achorripsis (Fig. 2) la densité de sons par mesure est indiquée pour chaque cas où il y a au moins un événement : exemple : case I γ, 6 = 6 sons par mesure, soit 39 sons dans cette case, c'est-à-dire 39 sons de flûte dans les mesures 14 à 20.5 de la partition.

Si l'on prend comme exemple la case III ιz du vecteur-matrice, dans laquelle doivent se placer 29 sons glissés ; comment trouver la vitesse de glissando, la durée et la hauteur de ces 29 sons ?

Iannis Xenakis pose trois hypothèses pour la vitesse de glissando :

FREQUENCE K	NOMBRE DE COLONNES	PRODUIT COL. x K
0	3	0
1	6	6
2	8	16
3	5	15
4	3	12
5	2	10
6	1	6
7	0	0
TOTAUX	28	65

Fig. 1. — *Fréquence d'occurrence K des événements simples dans les colonnes.*

1° la vitesse v de glissando peut être assimilée à celle d'un mouvement uniformément continu (Fig. 3) ;

2° la moyenne quadratique α (nómmée température) de toutes les valeurs possibles de v peut être proportionnelle à la densité sonore δ ;

3° les valeurs de v peuvent être distribuées au hasard, selon la loi de Gauss.

Une table de probabilité des vitesses est établie en fonction de ces hypothèses.

Chaque date de départ étant représentée par un point sur la droite temps, la table de probabilité des durées est établie selon la méthode décrite avec la formule :

$$P(dx) = \delta . e^{-\delta x} dx.$$

Pour les hauteurs, la méthode de calcul est celle décrite précédemment. La droite AB aura une longueur a correspondant à 80 demi-tons (tessiture

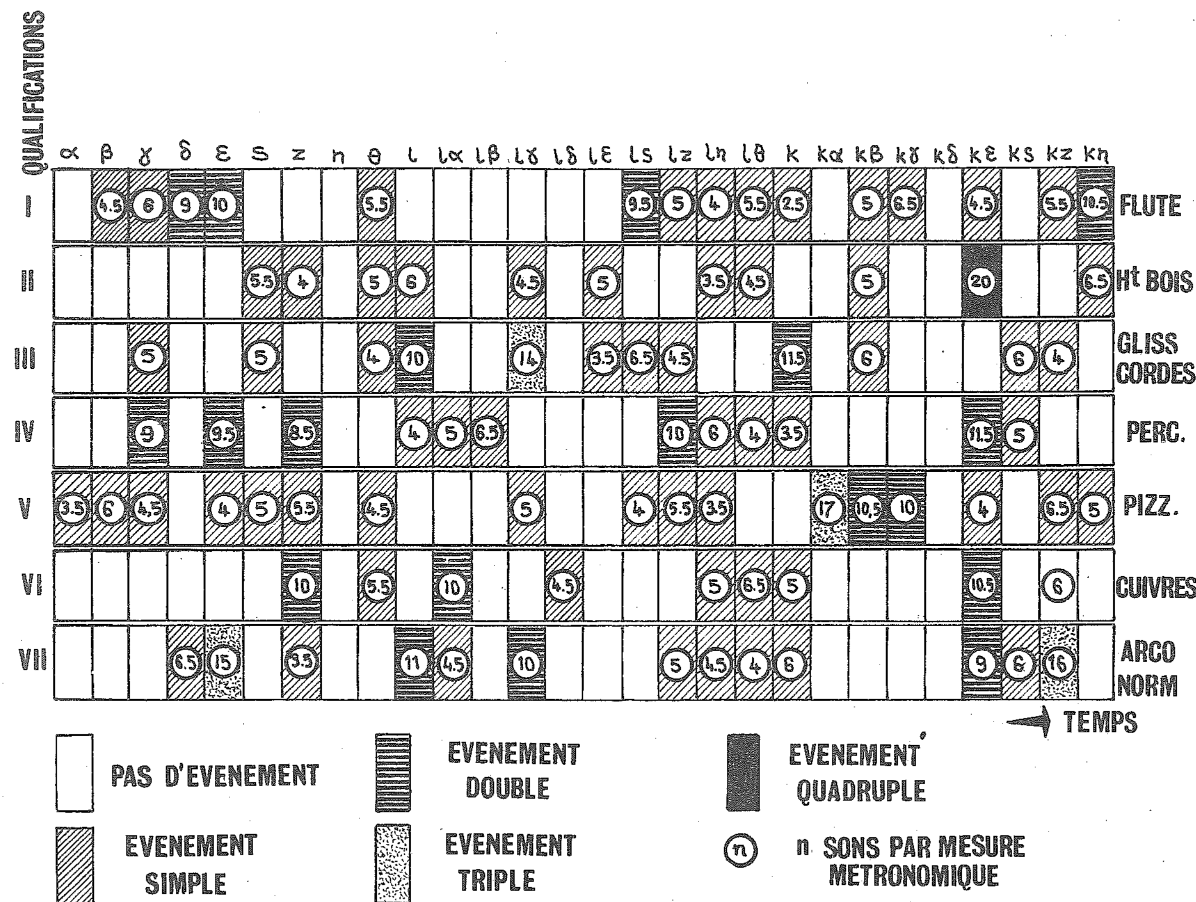


Fig. 2. — *Vecteur-Matrice d'Achorripsis.*

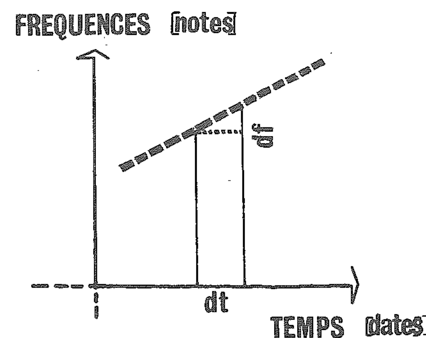


Fig. 3. — *Glissando* $v = \frac{df}{dt}$.

moyenne des cordes). Le segment intérieur à la droite AB correspondra à l'intervalle mélodique qui sépare les deux origines de deux glissandi successifs ou simultanés. De cette opération résulte la table de probabilité des intervalles.

Utilisation de l'IBM 7090

C'est la thèse du minimum de règles de composition d'Achorripsis, telle qu'elle vient d'être résumée, que Iannis Xenakis a utilisée pour élaborer le programme qui lui a permis de calculer toute une famille d'œuvres au moyen de l'ordinateur IBM 7090. Le compositeur explique lui-même les raisons et les buts de cette démarche.

« Dans tous les arts il a existé ce que nous pouvons appeler le rationalisme au sens étymologique : la recherche de la proportion. (...) Les règles de construction ont largement varié à travers les siècles, mais il y en a eu à toutes les époques. C'est la nécessité de se faire comprendre.

(...) or tout ce qui est règle, contrainte répétée, est un morceau de machine mentale, (...) un choix, un ensemble de décisions »[1].

Certains de ces mécanismes mentaux « secrétés par la pensée créatrice de l'homme », sont mathématisables, et peuvent trouver des correspondances avec certains mécanismes de la nature. Certains aspects mécanisables de la création artistique peuvent être simulés par des machines existantes ou à créer; il se trouve que les ordinateurs peuvent rendre certains services.

Iannis Xenakis place le rôle du compositeur actuel sur deux niveaux : celui de l'invention de schèmes (anciennement des formes) et de l'exploration des possibilités offertes par ces schèmes; et le niveau de la synthèse scientifique des moyens nouveaux de fabriquer et d'émettre les sons (convertisseur digital à-analogique par exemple).

Mise en programme

Comment s'est effectuée la mise en programme du schème d'Achorripsis? La thèse étant déjà établie, voici les différentes étapes du travail :

1° Formalisation. L'expression en formules mathématiques de la thèse, qui avait été réalisée pour le calcul à la main, a été adaptée aux structures de l'ordinateur.

2° Description séquentielle. C'est une mise en ordre dans le temps, faite point par point, en définissant pour les sons, hauteur, durée, date d'occurrence, instrument, façon de jouer (classe de timbre), pentes (glissandi) et dynamiques.

3° Organigramme. C'est une description séquentielle graphique.

4° Programme en langage Fortran : ce langage, inventé par I.B.M. est utilisé pour les problèmes scientifiques, et permet le dialogue avec la machine, qui, elle, traduit automatiquement le Fortran en langage binaire.

5° Perforation des cartes. Le programme est mis sous forme de cartes perforées.

6° Tests. Des essais de calcul du programme sont effectués au moyen de l'ordinateur, afin de détecter les erreurs de logique ou de langage, et surtout afin d'explorer le programme et d'en préciser les modalités d'exploitation.

7° Décodage de la sortie. La forme de sortie utilisée par Iannis Xenakis est la sortie numérique. Les résultats sont traduits par le compositeur en notation traditionnelle (partition).

Résultats

La sortie se compose de dix colonnes, qui indiquent de gauche à droite :

1° Numéro de l'événement sonore.

2° Date d'occurrence.

3° Classe de timbre (pizzicato, arco, col-legno, etc...).

4° Instrument.

5° Hauteur : les hauteurs sont numérotées de 0 à 70, du grave à l'aigu par demi-tons (le zéro pouvant être soit la hauteur la plus grave, soit une hauteur indéfinie). La décimale doit être arrondie.

6° Vitesse de glissando I; inversement proportionnelle à la densité de la séquence.

7° Vitesse de glissando 2; directement proportionnelle à la densité de la séquence.

8° Vitesse de glissando 3; indépendante de la densité de la séquence.

9° Durée; notée en secondes, les décimales (dont le nombre est fixé arbitrairement à 2) demandant souvent un ajustement.

10° Dynamique : de 1 à 64, 64 combinaisons, dont 44 distinctes, des quatre éléments PPP, P, F, FF. Exemple : FF > PPP < F

Quel est le rôle du compositeur au moment où il décode la sortie de l'ordinateur pour en faire une partition musicale? Iannis Xenakis a répondu à cette question en estimant à 10 % environ le pourcentage d'adaptation nécessaire des résultats : choix d'une des trois vitesses de glissandi pour toute l'œuvre ou pour chaque séquence, ajustement des durées et des dates d'occurrence. Les rythmes, pour lesquels le compositeur utilise largement les valeurs irrationnelles, sont très délicats à caser, et peuvent pour des raisons de possibilités instrumentales, nécessiter des arrangements.

Ainsi le principe du minimum de règles de composition est une structure abstraite, une machine à composer mentale, apte à engendrer des œuvres différentes, en fonction de données différentes. L'ordinateur joue le rôle d'un outil de travail qui, commandé par le mécanisme précis, « l'horlogerie probabiliste » pré-établie par le compositeur, fournit les résultats. Iannis Xenakis pense qu'on peut trouver d'autres modèles d'organisation dans les mathématiques, la génétique, la chimie, la biologie, etc...

Description séquentielle du programme

L'œuvre est une succession de séquences. Le programme, qui débute par la procédure de lecture des données, se compose de onze parties; après avoir calculé la durée de la séquence et le nombre de sons qu'elle contient, tous les paramètres sont calculés pour le premier son, puis pour le suivant, et ainsi de suite jusqu'à épuisement du nombre des sons fixé pour la séquence en cours. Le processus complet recommence pour le calcul d'une autre séquence. La liste des parties du programme s'établit comme suit :

1. Fixation de la durée des séquences; les durées sont indépendantes l'une de l'autre, mais avec une durée moyenne fixe, et leur succession est stochastique.

2. Densité moyenne de sons durant la séquence A_i Cette densité est comprise entre deux limites : limite inférieure arbitraire de 0,11 sons à la seconde, limite supérieure, fonction du nombre d'instruments, de leur nature et de la difficulté technique. Il a été adopté une progression logarithmique des densités base e = 2,718 (logarithmes népériens). L'indépendance des densités entre les séquences est tempérée par une mémoire de séquence à séquence.

3. Composition de l'orchestre durant la séquence A_i (Fig. 3 bis). Les densités vont en croissant de 0 à 6. Les instruments sont divisés en n classes de timbres et le dosage des classes se fait au hasard. La composition de l'orchestre est liée à la densité. Le diagramme doit être employé sous une forme cumulative : par exemple, le chiffre 0,35 pour la densité 6 décide de la classe 3 (harpe normale) : 0,16 + 0,18 = 0,34; classe 3 = 0,35 et 0,36. Pour la densité 2 le chiffre 0,35 déciderait de la classe 4 (clarinette).

Les procédures suivantes définissent, au moyen des lois du hasard les différents paramètres de chaque son.

4. Date d'occurrence du son N dans la séquence A_i. Cette partie sera étudiée en détail ultérieurement.

5. Attribution au son N d'un instrument de l'orchestre déjà calculé.

6. Hauteur en fonction de l'instrument. Les tables Hamax et Hamin, incluses dans les données, indiquent la limite supérieure et la limite inférieure de la tessiture de chaque instrument de l'orchestre.

La hauteur d'un son sera prise dans la tessiture de l'instrument correspondant, le hasard étant tempéré par une certaine mémoire de la hauteur précédente jouée par le même instrument (même processus que pour les densités).

7. Vitesse de glissement (si la classe de timbre est « glissando »). Trois types de vitesse sont définis, inversement proportionnelle, directement proportionnelle ou indépendante de la densité de la séquence (Fig. 4, organigramme de la partie 7).

8. Durée du son, les contraintes étant :

1° Longueur maximale de respiration.

2° Densité de la séquence.

3° Probabilité de la classe de timbre.

4° Probabilité de l'instrument.

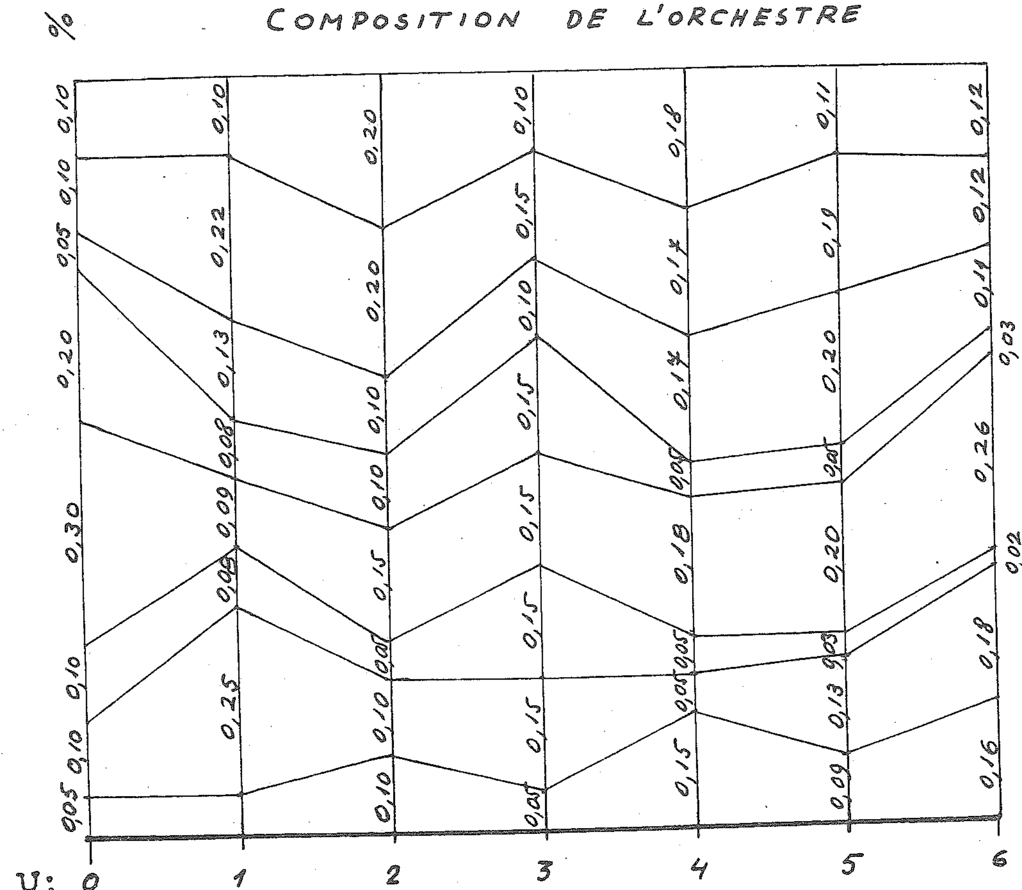
Une durée moyenne, inversement proportionnelle à la probabilité d'occurrence de l'instrument, est admise. La répartition des durées se fait d'après la loi de Gauss.

9. Attribution au son émis d'une forme dynamique, une des 64 combinaisons, dont 44 distinctes, des quatre éléments PPP, P, F, FF, permutés trois à trois avec répétition.

10. Cette procédure provoque l'itération du programme, à partir de la partie 4, afin de calculer les paramètres d'un autre son, et ce jusqu'à épuisement du nombre de sons prévus en partie 2 pour la séquence en cours.

11. Cette partie provoque une itération com-

ST/10-1, 080262



Densité = $DA_i = (V3).e^U$ $U = Log_e(DA_i/(V3))$

Fig. 3 bis. — *Diagramme de la composition de l'orchestre. ST/10.*

plète du programme, afin de calculer une nouvelle séquence.

Étude détaillée de la partie 4 du programme

Pour définir la date d'occurrence du son N à l'intérieur de la séquence A_i, la densité moyenne de sons C étant précisée en partie 2 du programme, on utilise la formule

$$f(x).dx = c.e^{-cx}.dx$$

Il faut adapter cette expression mathématique aux structures de la machine. L'ordinateur ne peut que tirer des nombres au hasard, avec équiprobabilité, compris entre o et 1. Il s'agit d'obtenir des segments x avec la probabilité f (x). dx. Il faut « moduler » l'équiprobabilité.

Soit une longueur quelconque x_0.

$pr(o \leqslant x \leqslant x_0) = f(x).dx = 1-e^{-cx_0} = F(x_0)$

$F(x_0)$ est la fonction de répartition des x.

$F(x_0) = pr(o \leqslant \gamma \leqslant \gamma_0) = \gamma_0$

$e^{-cx_0} = (1-\gamma_0)$

$-cx_0 = \log(1-\gamma_0)$

$$X_0 = \frac{\log(1-\gamma_0)}{c} \text{ pour tout } x_0 \geqslant o$$

FROM VI
VII A

FROM VI
VII B

```
PART 4, DEFINE INSTANT TA OF EACH POINT IN SEQUENCE A
   22 IF (KTEST2) 1004, 1003, 1004
 1004 TAV2 = TEMPS F (1)
 1003 N = 1
      T = 0.
      TA = 0.
      GO TO 25
   26 N = N+1
      X = RANDOM F (0., 1.)
      T = -LOG F (X)/DA
      TA = TA + T
   25 IF (KT1) 27, 28, 27
   27 WRITE OUTPUT TAPE 6, 103, N, X, T, TA
```

Partie 4 du programme en FORTRAN :

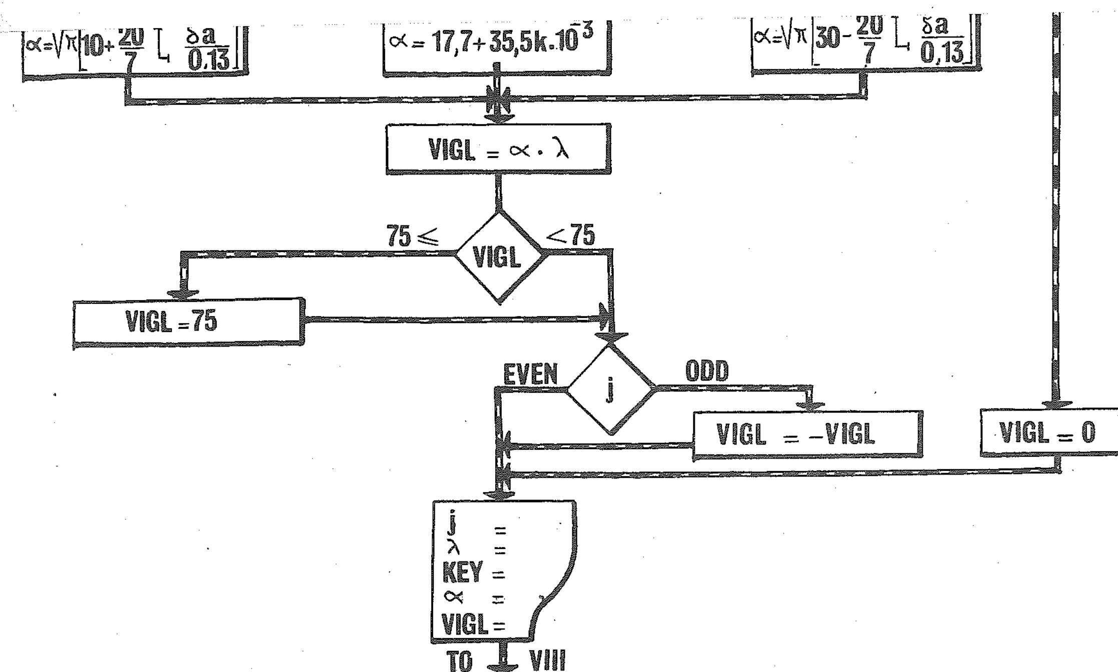
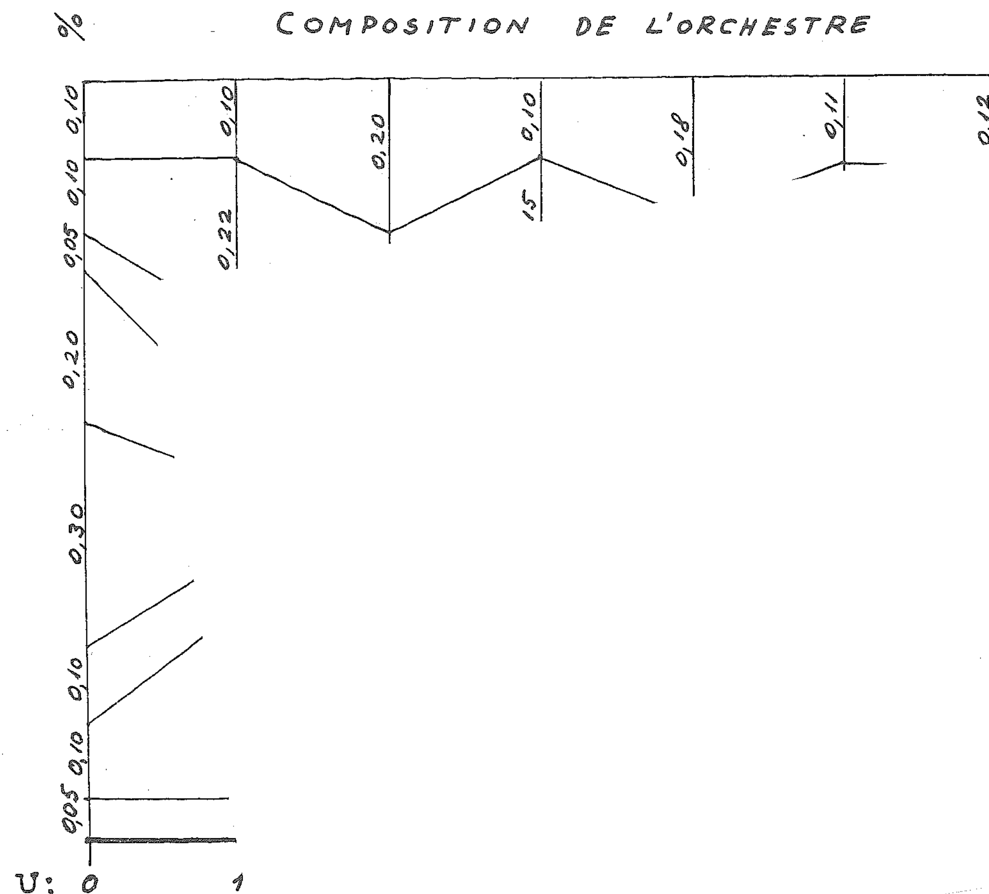


Fig. 4. — *Organigramme de la partie 7 du programme.*

ST/10-1, 080262



$= \nu A_i = (V3).e^{U} \qquad U = Log_e (DA_i/(V3))$

Fig. 3 bis. — *Diagramme de la composition de l'orchestre. ST/10.*

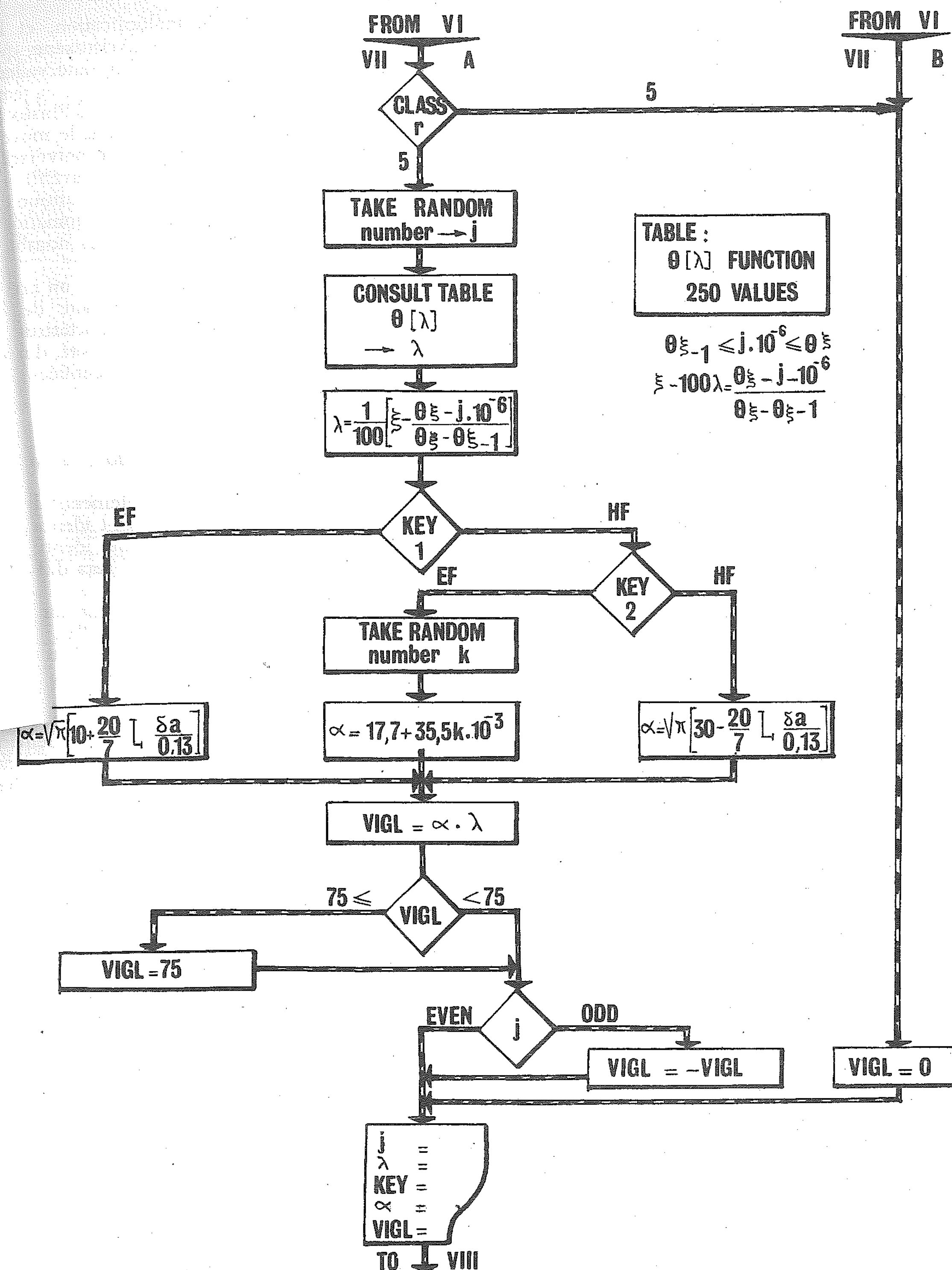


Fig. 4. — *Organigramme de la partie 7 du programme.*

plète du programme, afin de calculer une nouvelle séquence.

Étude détaillée de la partie 4 du programme

Pour définir la date d'occurrence du son N à l'intérieur de la séquence A_i, la densité moyenne de sons C étant précisée en partie 2 du programme, on utilise la formule

$$f(x).dx = c.e^{-cx}.dx$$

Il faut adapter cette expression mathématique aux structures de la machine. L'ordinateur ne peut que tirer des nombres au hasard, avec équiprobabilité, compris entre 0 et 1. Il s'agit d'obtenir des segments x avec la probabilité f (x). dx. Il faut « moduler » l'équiprobabilité.

Soit une longueur quelconque x_0.

$pr(0 \leq x \leq x_0) = f(x).dx = 1 - e^{-cx_0} = F(x_0)$

$F(x_0)$ est la fonction de répartition des x.

$F(x_0) = pr(0 \leq \gamma \leq \gamma_0) = \gamma_0$

$e^{-cx_0} = (1-\gamma_0)$

$-cx_0 = \log(1-\gamma_0)$

$$X_0 = \frac{\log(1-\gamma_0)}{c} \text{ pour tout } x_0 \geq 0$$

Comment cette formule est-elle exprimée en langage Fortran? Nous allons examiner, instruction par instruction, la partie 4 du programme.
Instructions 22 et 1004 : (K test 2) et TAV 2 sont utilisés pour calculer le temps d'ordinateur nécessaire pour calculer la séquence complète (K test 2) envoie à l'instruction 1004, puis à l'instruction 1003.
Instruction 1003 : N, numéro de l'événement sonore dont les paramètres vont être calculés par les différentes parties du programme, prend la valeur 1. T prend la valeur 0, TA (date d'occurrence de l'événement N à l'intérieur de la séquence A_i), prend la valeur 0. Aller à 25.
L'instruction 25 est, comme l'instruction 22, une instruction conditionnelle : SI (ktI) 27, 28, 27 le calcul de TA est terminé, le programme s'oriente vers l'instruction 27, puis vers l'instruction 28 qui est la première de la partie suivante.
Instruction 27 : écrire sur la bande de sortie 6, 103 (103 est le numéro du format qui indique, en fin de programme, sous quelle forme les données doivent être transmises) les valeurs de N, X, T, et TA.

Si dans l'instruction 25 (ktI) ne prend pas la valeur 27, 28, 27, alors le calcul de TA est à exécuter, le programme prend donc l'instruction 26.
Instruction 26 : N = N + I. Cette partie de l'instruction 26 n'est pas utilisée pour le premier calcul de l'instant TA, mais, lorsque tous les paramètres du son N de la séquence en cours auront été calculés dans les différentes parties du programme, la partie 10 provoquera une itération du programme qui refera tous les calculs pour le son N = N + I, et ce jusqu'à épuisement des sons prévus pour la séquence en cours. C'est donc à cet endroit précis que le programme reprend au moment de l'itération.
x = random F (0.,1) au moyen de random function, (fonction aléatoire), tirée d'un sous-programme, l'ordinateur tire un nombre au hasard, avec équiprobabilité, entre 0 et 1.
T = — log f (x) / da : da = c, densité moyenne de sons pendant la séquence en cours. Cette formule permet de moduler l'équiprobabilité.
TA = TA + T : la date d'occurrence TA est égale à TA + T (1re exécution O + T, itérations suivantes, valeur précédente de TA + T).

Axiomatique et formalisation des échelles

Après avoir rappelé que la musique repose, depuis l'antiquité grecque, 1° sur deux langages : celui des pythagoriciens, qui est un langage géométrique, basé sur des rapports de longueurs de cordes, avec l'opération de multiplication, et le langage arithmétique introduit par Aristoxène, qui utilise l'opération additive pour les intervalles; 2° sur les catégories hors-temps, en temps et temporelle, très inégalement amalgamées dans l'histoire de la musique, Iannis Xenakis recherche le moyen de bâtir une « synthèse cohérente et universelle dans le passé, dans le présent et dans l'avenir »[1].

Dans cette optique, il établit une axiomatique de la structure d'ordre total de l'échelle chromatique tempérée, inspirée de l'axiomatique des nombres de Peano.

« Termes premiers : O arrêt-origine, n un arrêt, n' l'arrêt issu du déplacement élémentaire de n, D l'ensemble des valeurs de la caractéristique sonore envisagée (hauteur, densité, intensité, durée, vitesse, ordre...). Les valeurs seront identifiées aux arrêts des déplacements.

Propositions premières (axiomes) :

1. L'arrêt O est élément de D.
2. Si l'arrêt n est élément de D., alors le nouvel arrêt n' est élément de D.
3. Si les arrêts n et m sont des éléments de D, alors les nouveaux arrêts n' et m' sont identiques, si, et seulement si, les arrêts n et m sont identiques.
4. Si l'arrêt n est élément de D, il sera différent de l'arrêt origine O.
5. Si les éléments appartenant à D ont une propriété spéciale P telle que l'arrêt O l'ait aussi, et si, pour tout élément n de D ayant cette propriété, l'élément n' l'a aussi, les éléments de D ont tous la propriété P. »

Ceci représente la définition axiomatique d'une échelle abstraite qui ne se rapporte pas seulement à l'échelle chromatique tempérée, mais qui peut s'appliquer à différentes grandeurs d'intervalles, et à différentes caractéristiques du domaine sonore D (hauteurs, intensités, densités, etc...).

Si l'on prend comme unité de déplacement le demi-ton tempéré de la gamme chromatique actuelle, pour former l'échelle de base, on peut établir des cribles qui ne laissent passer que certains éléments du total chromatique, ceci au moyen des classes résiduelles n modulo x.

Sur la Figure 5 sont représentées les classes résiduelles suivantes :

Classe 0 modulo 2 (2_0)
Classe 1 modulo 2 (2_1)
Classe 0 modulo 3 (3_0)
Classe 1 modulo 3 (3_1)
Classe 2 modulo 3 (3_2)
Classe 0 modulo 4 (4_0)
Classe 1 modulo 4 (4_1)
Classe 2 modulo 4 (4_2)
Classe 3 modulo 4 (4_3)

1. Vers une métamusique. La Nef, cahier n° 29, p. 134. Tallandier éditeur.

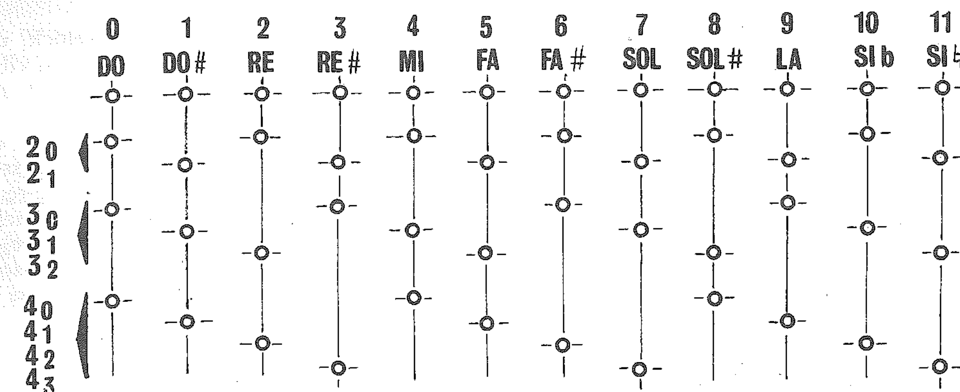


Fig. 5. — *Tableau des classes résiduelles 0, 1 mod. 2*
0, 1, 2 mod. 3
0, 1, 2, 3 mod. 4

Les trois opérations de la Logique, la réunion, notée U, l'intersection, notée ∩, et le complémentaire noté par une barre au-dessus du module, permettent de construire toutes les gammes tempérées.

$2_0 \cup 2_1$ = gamme chromatique (total chromatique)
$2_0 \cap 2_1$ = pas de note, le vide
$\bar{2}_0$ = 2 . (complémentaire de 2 = ce qui n'est pas contenu dans 2).

La gamme majeure, selon les principes précédents établis par Iannis Xenakis, peut s'écrire de la façon suivante :

$(\bar{3}_2 \cap 4_0) \cup (\bar{3}_1 \cap 4_1) \cup (3_2 \cap 4_2) \cup (\bar{3}_0 \cap 4_3)$
do mi fa la ré sol si

Comment ce résultat a-t-il été obtenu?

En se reportant à la Figure 5, on peut établir le tableau suivant :

$3_0 \cap 4_0 = 12_0$ = DO
$3_2 \cap 4_2 = 12_2$ = RE
$3_1 \cap 4_0 = 12_4$ = MI
$3_2 \cap 4_1 = 12_5$ = FA
$3_1 \cap 4_3 = 12_7$ = SOL
$3_0 \cap 4_1 = 12_9$ = LA
$3_2 \cap 4_3 = 12_{11}$ = SI

$(3_0 \cap 4_0) \cup (3_1 \cap 4_0) = (3_0 \cup 3_1) \cap 4_0$ (distributivité)
$(3_0 \cup 3_1) = \bar{3}_2$ donc
$(3_0 \cap 4_0) \cup (3_1 \cap 4_0) = (\bar{3}_2 \cap 4_0)$

Pour exprimer une transposition d'un demi-ton de la gamme de DO majeur, il suffit d'ajouter I à l'indice, l'addition étant faite modulo du crible correspondant.

gamme de DO ♯ majeur :
$(\bar{3}_0 \cap 4_1) \cup (\bar{3}_2 \cap 4_2) \cup (3_0 \cap 4_3) \cup (\bar{3}_1 \cap 4_0)$
gamme de RE majeur :
$(\bar{3}_1 \cap 4_2) \cup (\bar{3}_0 \cap 4_3) \cup (3_1 \cap 4_0) \cup (\bar{3}_2 \cap 4_1)$

La formule générale de la gamme majeure est :
$(\bar{3}_{n+2} \cap 4_n) \cup (\bar{3}_{n+1} \cap 4_{n+1}) \cup (3_{n+2} \cap 4_{n+2}) \cup (\bar{3}_n \cap 4_{n+3})$

L'unité de base des cribles peut être changée, le demi-ton étant remplacé par un quart de ton, ou par un segment aristoxénien (une octave = 72 segments aristoxéniens), ou par toute autre unité.

La théorie des cribles, telle que Iannis Xenakis l'a définie, est générale, applicable aux différents paramètres du son; elle permet d'exprimer n'importe quelle échelle par des fonctions logiques, et elle est entièrement mécanisable. Le compositeur pense que l'exploration et l'utilisation de cette théorie, sous forme de tests et de modèles traitables par ordinateur, peut faire « grandement avancer les sciences musicales ».

Projets d'avenir

Iannis Xenakis se propose maintenant de faire des recherches sur la synthèse des sons par convertisseur numéral à analogique. Pensant que le théorème de Fourier, sur lequel est basé actuellement la synthèse artificielle des sons, ne peut pas rendre compte de tous les sons, puisqu'il ne s'applique bien qu'à ceux qui sont périodiques, le compositeur juge souhaitable la recherche d'autres structures.

C'est un problème complexe à la fois mathématique et technologique qui fait apparaître la nécessité d'un travail de groupe. Aussi, est-ce avec les équipes de travail de l'E.M.A.M.U. (équipe de mathématique et d'automatique musicales, travaillant à Paris dans le cadre de l'École

Pratique des Hautes Études, et aux États-Unis à l'Université de Bloomington), que Iannis Xenakis compte aborder ces recherches. L'équipe française comprend des spécialistes de différentes disciplines (mathématique, électronique, programmation, esthétique, psychologie, etc...), et constitue un « instrument inter-disciplinaire pour l'extension de la composition musicale »[1]. Une installation complète permettant de réaliser la synthèse artificielle des sons est actuellement en cours de réalisation; elle permettra à Iannis Xenakis de poursuivre avec l'équipe de l'E.M.A.M.U. le but pratique qu'il a lui-même défini : « La généralisation de procédés de production de la musique contemporaine avec les moyens techniques d'aujourd'hui »[2].

Conclusion

Outre la musique stochastique et les recherches de formalisation du langage musical, Iannis Xenakis a aussi utilisé la logique (musique symbolique), et la théorie mathématique des jeux (musique stratégique). La plupart de ses œuvres sont écrites pour des instruments traditionnels, mais quelques-unes d'entre elles sont réalisées sur bande magnétique, avec la technique électro-acoustique.

La personnalité hors-série, les conceptions musicales si nouvelles de Iannis Xenakis font de sa démarche une de celles qui marquent une époque et qui provoquent controverses et passions.

Liste des œuvres calculées par l'ordinateur 7090 IBM à Paris avec le programme de musique stochastique.

ST/10 (1956-62) 10 exécutants : 1 clarinette, une clarinette-basse, deux cors, harpe, batterie : 5 temple-blocks, 4 toms-toms, 2 congas, un wood-block — quator à cordes. Œuvre créée à IBM Paris en 1962 sous la direction de Constantin Simonovic.

AMORSIMA-MORSIMA (1956-62) 10 exécutants, mêmes instruments que pour ST/10. Œuvre créée à Athènes en 1962 sous la Direction de L. Foss.

MORSIMA - AMORSIMA (1956 - 62) 4 instruments : piano, violon, violoncelle et contrebasse. Œuvre créée en 1962 à Athènes sous la direction de L. Foss.

ST/48 (1959-62) 48 exécutants : un piccolo, une flûte en do, 2 hautbois, une clarinette en si bémol, une clarinette basse, un basson, un contre-basson, deux cors en fa, deux trompettes, deux trombones-ténor, batterie (4 toms, 5 temple-block, un wood-block, quatre timbales, un tambour, un vibraphone, un marimbaphone), et cordes 8.8.6.6.4. Œuvre commandée par l'O.R.T.F.

ATRÉES (1958-62) 10 exécutants : une flûte, une clarinette en si bémol, une clarinette basse, un cor en fa, une trompette, un trombone-ténor, percussion (maracas, cymbales suspendues, gong, 5 temple-blocks, 4 toms, un vibraphone), un violon, un violoncelle. Œuvre commandée par l'O.R.T.F. et créée à Paris en 1962 sous la direction de Constantin Simonovic.

EONTA (1963-64) 5 exécutants : piano soliste, deux trompettes, trois trombones ténor. Œuvre créée à Paris, au Domaine Musical, en 1964 sous la direction de Pierre Boulez. Certaines parties de cette œuvre seulement ont été calculées par l'IBM 7090, notamment le solo de piano du début.

ST/4 (1956-62) 4 instruments : piano, violon, violoncelle et contrebasse. Œuvre créée en 1962 à Paris par le quatuor Bernède.

Discographie des œuvres calculées par ordinateur

ST/4 par le quator à cordes Bernède Paris. Un disque 17 cm Expérimental Studio Hermann Scherchen, Gravesano (1965), accompagnant le n° 26 des Gravesaner Blätter.
EONTA — Ensemble instrumental de musique contemporaine de Paris, Direction Simonovic, avec METASTASIS et PITHOPRAKTA Orchestre National de l'O.R.T.F. Direction Maurice Leroux. Disque 30 cm. Chant du Monde mono LDX 8368 stéréo LDX A 48368 Grand Prix National du Disque 1966.
Pathé-Marconi CVC 2086. Disque 30 cm : ATRÉES Ensemble Instrumental de Musique Contemporaine de Paris. Direction Constantin Simonovic.
MORSIMA-AMORSIMA G. Pludermacher, piano; J.C. Bernède, violon, P. Boufil violoncelle, J. Cazauran, contrebasse.
ST/4 Quator Bernède.
NOMOS ALPHA Pierre Penassou.

Documentation

Il a paru intéressant de grouper ici quelques opinions de provenances diverses.

« Musicien de profondes connaissances, être pur et frappé du feu créatif, j'attends de lui des œuvres d'art exprimant de nouvelles capacités de l'homme. — Hermann Scherchen »[1].

1. Entretien avec Xenakis et l'équipe de l'E.M.A.M.U. Maurice Fleuret, Semaines Musicales Internationales de Paris, octobre 1968.
2. Id.

1. Bulletin d'Information n° 23. Boosey and Hawkes Xenakis, musicien d'avant-garde.

« Cette musique de machine est une musique suprêmement humaine : elle peut sembler folle par instant, mais de cette folie dont certains dieux de l'Olympe pouvaient être habités. — Antoine Goléa *(Carrefour)* ».

« Dans son désir de tout reconstruire sur des principes abstraits, simples et féconds, la logique musicale de Xenakis descend en droite ligne de celle des philosophes ioniens (...). Si l'on admet que l'art sacré n'est pas un lieu de communion entre les hommes, mais un pont qui mène à la conquête de l'absolu, sa première manifestation en Occident est l'œuvre de Xenakis. — François-Bernard Mâche »[1].

Alain Resnais à qui Pierre Barbaud avait proposé Iannis Xenakis comme compositeur pour la musique de « L'année dernière à Marienbad » trouve ce que fait Xenakis trop moderne : « C'est trop fort pour moi » dit-il[2].

« Nous sommes séduits, d'autres sont heurtés, mais très peu étonnés par les œuvres de Xenakis qui appartiennent avec une telle évidence au monde de l'homme de notre temps, que nous oublions de leur chercher des ancêtres alors que nous pré-

Le chapitre V a été rédigé d'après les travaux effectués dans les laboratoires de la Bell Telephone of New Jersey par Messieurs M.V. Mathews, N. Guttman, J.R. Pierce, J.C. Risset et L. Rosler.

diffusent une ronde indéfiniment mouvante de sons entraînant vers une sorte de vertige? (...) A coup sûr Xenakis comme il se le propose, met l'être en branle — et c'est là son génie, qu'il s'agisse d'un bon ou d'un mauvais génie. (...) « Pourquoi n'avoir pas diffusé Bohor à la fin? Pourquoi le son était-il si fort? Pourquoi cela fait-il mal? » Ce furent quelques-unes des questions posées au compositeur au cours d'un débat qui eut lieu à l'issue des concerts. (...) « Admettez-vous que votre musique peut, à la limite, être dangereuse? » A cette question, Xenakis, honnêtement, répond : « C'est possible. Pourquoi pas? — Michel Legris *(Le Monde)* »[1].

« Il se trouve que chacune de ses œuvres dépasse de loin le seul propos sonore. (...) Chaque fois une étape est franchie, non pas seulement dans la conquête d'un langage plus proche de notre sensibilité, mais bien dans la remise en question des plus profonds ressorts de la création musicale. — Maurice Fleuret *(Le Nouvel Observateur)*. »

CHAPITRE V

A cette question, la réponse est simple : l'onde sonore peut être exprimée par une séquence de nombres. Cette transformation s'effectue de la façon suivante : la forme de l'onde sonore que l'on désire produire étant déterminée, des mesures d'amplitude également espacées sont prises; le résultat est une suite de nombres représentant les élongations successives de l'onde. Cette opération, nommée échantillonnage, est représentée sur la Fig. 1.

Pour obtenir une reproduction fidèle du son, il faut respecter un certain champ de fréquences, très variable selon les sons, que nous nommerons bande de passage B. Pour avoir une description précise de l'onde sonore, le théorème mathématique d'échantillonnage dit qu'il faut mesurer l'amplitude chaque $\frac{1}{2B}$ seconde. Pour une bande de passage B de 10 000 Hz, 20 000 échantillons par seconde seraient donc nécessaires à une représentation exacte de l'onde.

1. Encyclopédie des musiques sacrées Éditions Labergerie, 13, rue de Tournon, Paris, tome I[er], pp. 350-352 « la couleur grecque chez Xenakis » par François-Bernard Mache.
Cet article soulève le problème intéressant des sources auxquelles Xenakis a puisé pour former ses propres conceptions musicales. Le compositeur lui-même évoque souvent Pythagore : « Pythagore a fondé l'arithmétique, le culte des nombres, en partant de la musique. (...). Dans l'orphisme, la musique joue le rôle de redresseur des âmes pour échapper au cycle infernal des réincarnations. (...). C'est donc pour des raisons religieuses que Pythagore découvrit les procédés par lesquels on fait de la musique, et alors la relation entre les longueurs de cordes et les sons et puis, à partir de là, le rapport des sons et des nombres; de plus, comme la géométrie était aussi chose naissante à l'époque, Pythagore s'y engagea. En y ajoutant l'arithmétique, il fondait les bases des mathématiques modernes. » (Bulletin d'information n° 23 de Boosey and Hawkes, pp. 12-13). Il est intéressant de noter aussi que Iannis Xenakis a puisé des sources d'inspiration dans les grands thèmes de la tragédie grecque (Les suppliantes, l'Orestie).
2. L'Arc, n° 31, p. 82.

1. En effet, il existe un seuil d'intensité, égal à 130 décibels, au-delà duquel le son risque de provoquer des malaises physiques.

Pratique des Hautes Études, et aux États-Unis à l'Université de Bloomington), que Iannis Xenakis compte aborder ces recherches. L'équipe française comprend des spécialistes de différentes disciplines (mathématique, électronique, programmation, esthétique, psychologie, etc...), et constitue un « instrument inter-disciplinaire pour l'extension de la composition musicale »[1]. Une installation complète permettant de réaliser la synthèse artificielle des sons est actuellement en cours de réalisation; elle permettra à Iannis Xenakis de poursuivre avec l'équipe de l'E.M.A.M.U. le but pratique qu'il a lui-même défini : « La généralisation de procédés de production de la musique contemporaine avec les moyens techniques d'aujourd'hui »[2].

Conclusion

Outre la musique stochastique et les recherches de formalisation du langage musical, Iannis Xenakis a aussi utilisé la logique (musique symbolique),

... par l'ordinateur 7090 IBM à Paris avec le programme de musique stochastique.

ST/10 (1956-62) 10 exécutants : 1 clarinette, une clarinette-basse, deux cors, harpe, batterie : 5 temple-blocks, 4 toms-toms, 2 congas, un wood-block — quator à cordes. Œuvre créée à IBM Paris en 1962 sous la direction de Constantin Simonovic.

AMORSIMA-MORSIMA (1956-62) 10 exécutants, mêmes instruments que pour ST/10. Œuvre créée à Athènes en 1962 sous la Direction de L. Foss.

MORSIMA - AMORSIMA (1956 - 62) 4 instruments : piano, violon, violoncelle et contrebasse. Œuvre créée en 1962 à Athènes sous la direction de L. Foss.

ST/48 (1959-62) 48 exécutants : un piccolo, une flûte en do, 2 hautbois, une clarinette en si bémol, une clarinette basse, un basson, un contre-basson, deux cors en fa, deux trompettes, deux trombones-

1. Entretien avec Xenakis et l'équipe de l'E.M.A.M.U. Maurice Fleuret, Semaines Musicales Internationales de Paris, octobre 1968.

2. Id.

ténor, batterie (4 toms, 5 temple-block, un wood-block, quatre timbales, un tambour, un vibraphone, un marimbaphone), et cordes 8.8.6.6.4. Œuvre commandée par l'O.R.T.F.

ATRÉES (1958-62) 10 exécutants : une flûte, une clarinette en si bémol, une clarinette basse, un cor en fa, une trompette, un trombone-ténor, percussion (maracas, cymbales suspendues, gong, 5 temple-blocks, 4 toms, un vibraphone), un violon, un violoncelle. Œuvre commandée par l'O.R.T.F. et créée à Paris en 1962 sous la direction de Constantin Simonovic.

EONTA (1963-64) 5 exécutants : piano soliste, deux trompettes, trois trombones ténor. Œuvre créée à Paris, au Domaine Musical, en 1964 sous la direction de Pierre Boulez. Certaines parties de cette œuvre seulement ont été calculées par l'IBM 7090, notamment le solo de piano du début.

ST/4 (1956-62) 4 instruments : piano, violon, violoncelle et contrebasse. Œuvre créée en 1962 à Paris par le quatuor Bernède.

Discographie des œuvres

... avec METASTASIS et PITHOPRAKTA Orchestre National de l'O.R.T.F. Direction Maurice Leroux. Disque 30 cm. Chant du Monde mono LDX 8368 stéréo LDX A 48368 Grand Prix National du Disque 1966.

Pathé-Marconi CVČ 2086. Disque 30 cm : ATRÉES Ensemble Instrumental de Musique Contemporaine de Paris. Direction Constantin Simonovic.

MORSIMA-AMORSIMA G. Pludermacher, piano; J.C. Bernède, violon, P. Boufil violoncelle, J. Cazauran, contrebasse.

ST/4 Quator Bernède.

NOMOS ALPHA Pierre Penassou.

Documentation

Il a paru intéressant de grouper ici quelques opinions de provenances diverses.

« Musicien de profondes connaissances, être pur et frappé du feu créatif, j'attends de lui des œuvres d'art exprimant de nouvelles capacités de l'homme. — Hermann Scherchen »[1].

1. Bulletin d'Information n° 23. Boosey and Hawkes Xenakis, musicien d'avant-garde.

« Cette musique de machine est une musique suprêmement humaine : elle peut sembler folle par instant, mais de cette folie dont certains dieux de l'Olympe pouvaient être habités. — Antoine Goléa *(Carrefour)* ».

« Dans son désir de tout reconstruire sur des principes abstraits, simples et féconds, la logique musicale de Xenakis descend en droite ligne de celle des philosophes ioniens (...). Si l'on admet que l'art sacré n'est pas un lieu de communion entre les hommes, mais un pont qui mène à la conquête de l'absolu, sa première manifestation en Occident est l'œuvre de Xenakis. — François-Bernard Mâche »[1].

Alain Resnais à qui Pierre Barbaud avait proposé Iannis Xenakis comme compositeur pour la musique de « L'année dernière à Marienbad » trouve ce que fait Xenakis trop moderne : « C'est trop fort pour moi » dit-il[2].

« Nous sommes séduits, d'autres sont heurtés, mais très peu étonnés par les œuvres de Xenakis qui appartiennent avec une telle évidence au monde de l'homme de notre temps, que nous oublions de leur chercher des ancêtres alors que nous prévoyons leur descendance. — Michel Philippot *(Musique de tous les temps n° 20)*. »

Michel Legris évoque dans *Le Monde,* le concert final de la journée Xenakis des Semaines Musicales Internationales de Paris (octobre 1968), et les réactions de l'auditoire.

« (...) Xenakis (...) souhaite une musique qui, selon son propos, « agit sur tout l'être ». (...) Comment décrire Bohor, où quatre hauts-parleurs diffusent une ronde indéfiniment mouvante de sons entraînant vers une sorte de vertige? (...) A coup sûr Xenakis comme il se le propose, met l'être

1. Encyclopédie des musiques sacrées Éditions Labergerie, 13, rue de Tournon, Paris, tome I[er], pp. 350-352 « la couleur grecque chez Xenakis » par François-Bernard Mache.

Cet article soulève le problème intéressant des sources auxquelles Xenakis a puisé pour former ses propres conceptions musicales. Le compositeur lui-même évoque souvent Pythagore : « Pythagore a fondé l'arithmétique, le culte des nombres, en partant de la musique. (...). Dans l'orphisme, la musique joue le rôle de redresseur des âmes pour échapper au cycle infernal des réincarnations. (...). C'est donc pour des raisons religieuses que Pythagore découvrit les procédés par lesquels on fait de la musique, et alors la relation entre les longueurs de cordes et les sons et puis, à partir de là, le rapport des sons et des nombres; de plus, comme la géométrie était aussi chose naissante à l'époque, Pythagore s'y engagea. En y ajoutant l'arithmétique, il fondait les bases des mathématiques modernes. » (Bulletin d'information n° 23 de Boosey and Hawkes, pp. 12-13). Il est intéressant de noter aussi que Iannis Xenakis a puisé des sources d'inspiration dans les grands thèmes de la tragédie grecque (Les suppliantes, l'Orestie).

2. L'Arc, n° 31, p. 82.

en branle — et c'est là son génie, qu'il s'agisse d'un bon ou d'un mauvais génie. (...) « Pourquoi n'avoir pas diffusé Bohor à la fin? Pourquoi le son était-il si fort? Pourquoi cela fait-il mal? » Ce furent quelques-unes des questions posées au compositeur au cours d'un débat qui eut lieu à l'issue des concerts. (...) « Admettez-vous que votre musique peut, à la limite, être dangereuse? » A cette question, Xenakis, honnêtement, répond : « C'est possible. Pourquoi pas? — Michel Legris *(Le Monde)* »[1].

« Il se trouve que chacune de ses œuvres dépasse de loin le seul propos sonore. (...) Chaque fois une étape est franchie, non pas seulement dans la conquête d'un langage plus proche de notre sensibilité, mais bien dans la remise en question des plus profonds ressorts de la création musicale. — Maurice Fleuret *(Le Nouvel Observateur)*. »

CHAPITRE V

LES SONS SYNTHÉTIQUES

Le son est produit par les vibrations d'un corps, transmises sous forme d'ondes sonores à l'oreille. Comment peut-on utiliser les ordinateurs, qui travaillent sur des nombres, pour produire des sons?

A cette question, la réponse est simple : l'onde sonore peut être exprimée par une séquence de nombres. Cette transformation s'effectue de la façon suivante : la forme de l'onde sonore que l'on désire produire étant déterminée, des mesures d'amplitude également espacées sont prises; le résultat est une suite de nombres représentant les élongations successives de l'onde. Cette opération, nommée échantillonnage, est représentée sur la Fig. 1.

Pour obtenir une reproduction fidèle du son, il faut respecter un certain champ de fréquences, très variable selon les sons, que nous nommerons bande de passage B. Pour avoir une description précise de l'onde sonore, le théorème mathématique d'échantillonnage dit qu'il faut mesurer l'amplitude chaque $\frac{1}{2B}$ seconde. Pour une bande de passage B de 10 000 Hz, 20 000 échantillons par seconde seraient donc nécessaires à une représentation exacte de l'onde.

1. En effet, il existe un seuil d'intensité, égal à 130 décibels, au-delà duquel le son risque de provoquer des malaises physiques.

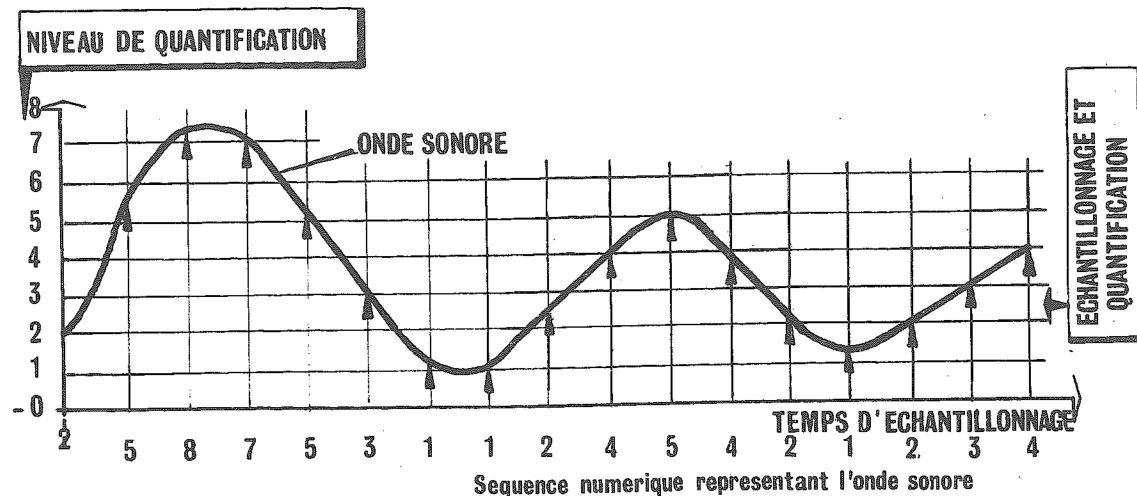


Fig. 1. — *Échantillonnage et quantification.*

On utilise généralement des nombres de quatre chiffres, pouvant spécifier n'importe quelle amplitude de 0 à 9999. La représentation d'une fonction continue, l'onde sonore, avec un nombre qui ne peut prendre que des valeurs entières entraîne une erreur qui produit un « bruit de quantification »; cet inconvénient reste mineur, puisque le bruit de quantification est inférieur au signal lui-même de plus de 60 dB.

Le procédé décrit est la conversion d'une quantité analogique, l'onde sonore, en une quantité numérale exprimée par la suite de nombres. Pour produire le son voulu, il faut effectuer le processus inverse, c'est-à-dire la conversion numéral-analogique. La forme d'onde est reconstituée d'après les échantillons, comme on peut le voir sur la Fig. 2.

Le circuit nécessaire à la production de sons synthétiques est donc le suivant : l'ordinateur, programmé d'une façon adéquate, produit des séquences de nombres décrivant les ondes sonores et les imprime sur une bande magnétique numérale. Au moyen d'un convertisseur numéral-analogique, ces nombres sont convertis en impulsions d'amplitude proportionnée qui passent à travers un filtre passe-bas, puis sont envoyées dans un haut-parleur pour l'écoute directe, ou à l'entrée d'un magnétophone pour être enregistrées; la bande analogique obtenue est alors disponible pour l'écoute (Fig. 3).

Une question d'importance capitale se pose : pour que l'ordinateur fournisse des séquences de nombres décrivant fidèlement les sons désirés, quelles instructions faut-il lui donner? Les renseignements à fournir sont les spécifications numériques des caractéristiques du son, ou paramètres : la durée, l'amplitude (qui correspond à la force), la fréquence (correspondant à la hauteur), la forme

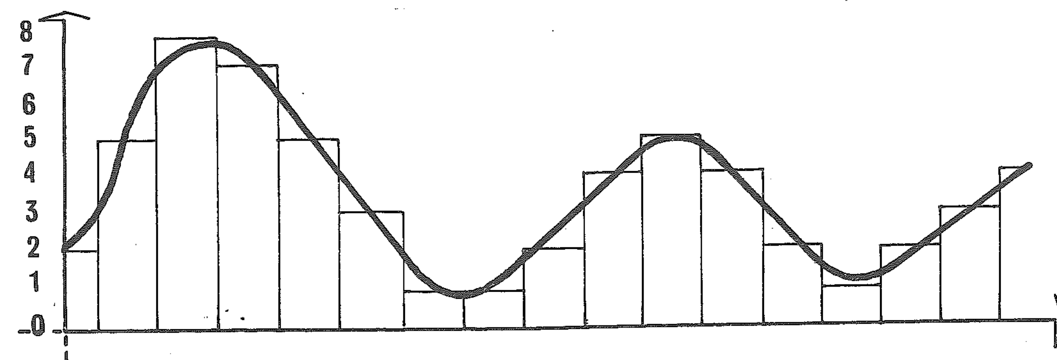


Fig. 2. — *Reconstitution de l'onde sonore d'après la séquence de nombres.*

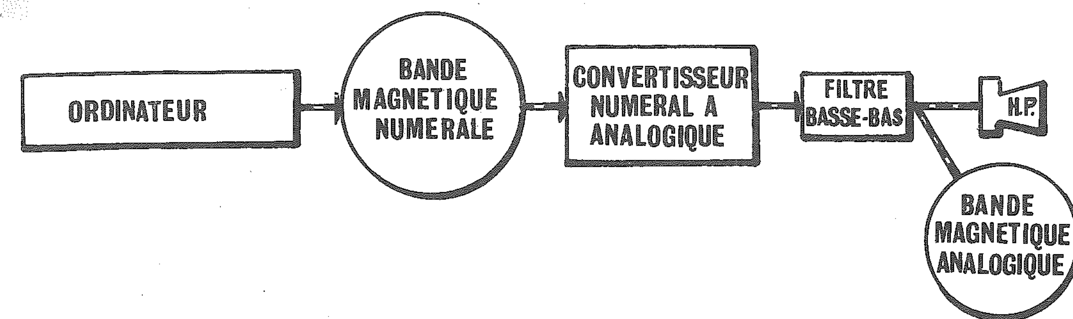


Fig. 3. — *Schéma du procédé de production de sons synthétiques.*

d'onde, l'attaque et la chute (correspondant à la qualité particulière du son, le timbre). Un programme approprié est donc indispensable.

Il est actuellement possible de générer des sons semblables à ceux de la musique traditionnelle, mais aussi de nouvelles sortes de sons. Des séquences temporelles peuvent être obtenues, ainsi que la combinaison simultanée de plusieurs voix. Ces possibilités sont fournies par le programme MUSIC IV, dont les principales caractéristiques vont être exposées, ainsi que celles de l'entrée graphique offerte par la console GRAPHIC I.

Le programme MUSIC IV

Pour établir les programmes qui, de perfectionnement en perfectionnement, ont abouti à la mise au point de MUSIC IV, quelques postulats de base très simples ont été pris en considération :

La musique peut être envisagée comme une séquence temporelle d'événements acoustiques, éventuellement appelés notes, plusieurs séquences, les voix, étant généralement additionnées ensemble. Les notes individuelles correspondent le plus souvent à des fonctions quasi-périodiques, dont les principaux paramètres sont la durée, la fréquence, et la forme d'onde. Cependant certains bruits dont les fréquences ne sont pas réparties de façon régulière ne correspondent pas à cette description. De plus, certains effets sont très significatifs pour l'oreille : l'attaque et la chute, qui influencent très fortement le timbre d'un son, la modulation de fréquence ou vibrato, et la modulation d'amplitude ou tremolo.

La base du programme est la formation de différents « instruments », ce terme étant employé par analogie puisqu'il s'agit d'un ensemble d'instructions-machine. Le compositeur qui utilise MUSIC IV peut former les « instruments » de son choix en réalisant des assemblages différents avec des blocs nommés « générateurs-unités », chaque bloc étant une macro-instruction qui effectue une opération déterminée. Il y a plus de dix sortes de blocs disponibles, les plus usités étant les trois qui sont représentés sur la Fig. 4.

Le premier de ces générateurs-unités est un oscillateur qui produit des formes d'onde périodiques; la fréquence, qui n'est pas forcément constante, est déterminée par l'entrée FREQ. Une seconde entrée, MOD, peut être utilisée de différentes manières, entre autres pour contrôler l'amplitude de la sortie. La forme d'onde est déter-

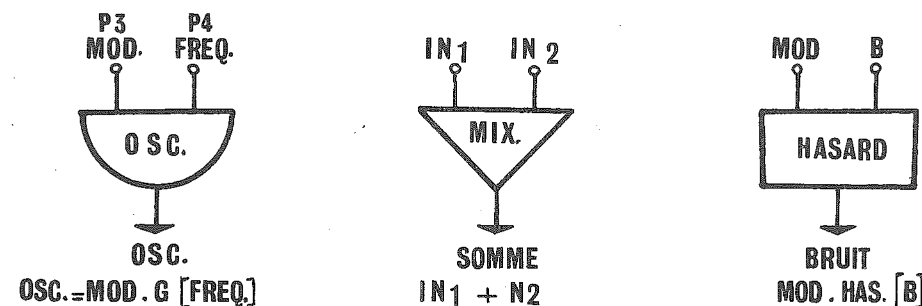


Fig. 4. — *Générateurs-unités.*

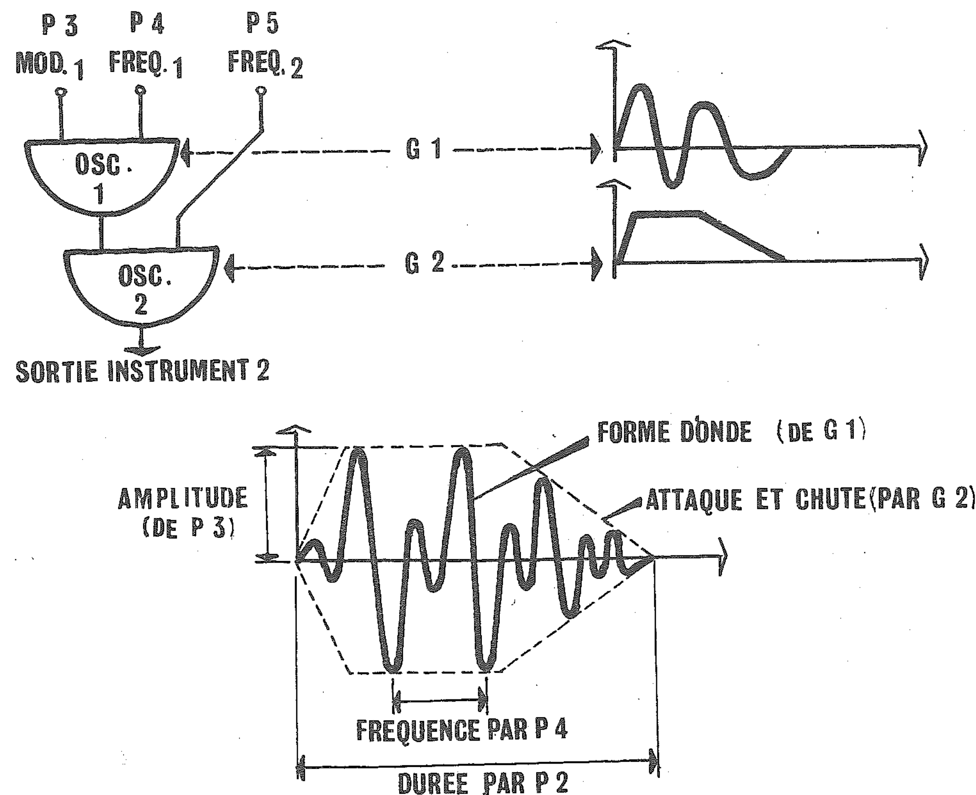


Fig. 5. — *Instrument avec attaque et chute.*

minée par une fonction arbitraire emmagasinée dans la mémoire de l'ordinateur.

La sortie du second bloc, MIX, est la somme de ses deux entrées IN 1 et IN 2.

Le troisième bloc est un générateur de bruits dont les fréquences sont réparties d'une façon aléatoire, produits au moyen d'un algorithme. B est une entrée correspondant à l'indication du champ de fréquences du bruit, de 0 à B Hz.

Un instrument très simple est formé d'un seul

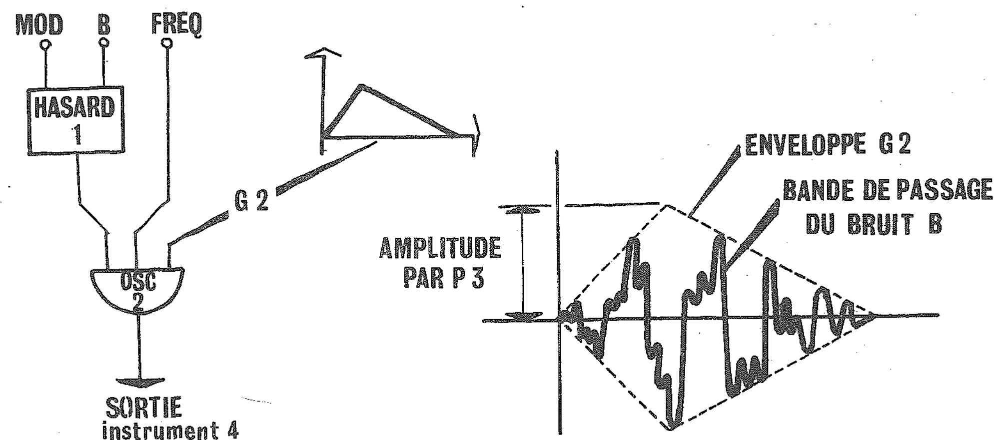


Fig. 6. — *Instrument produisant un bruit.*

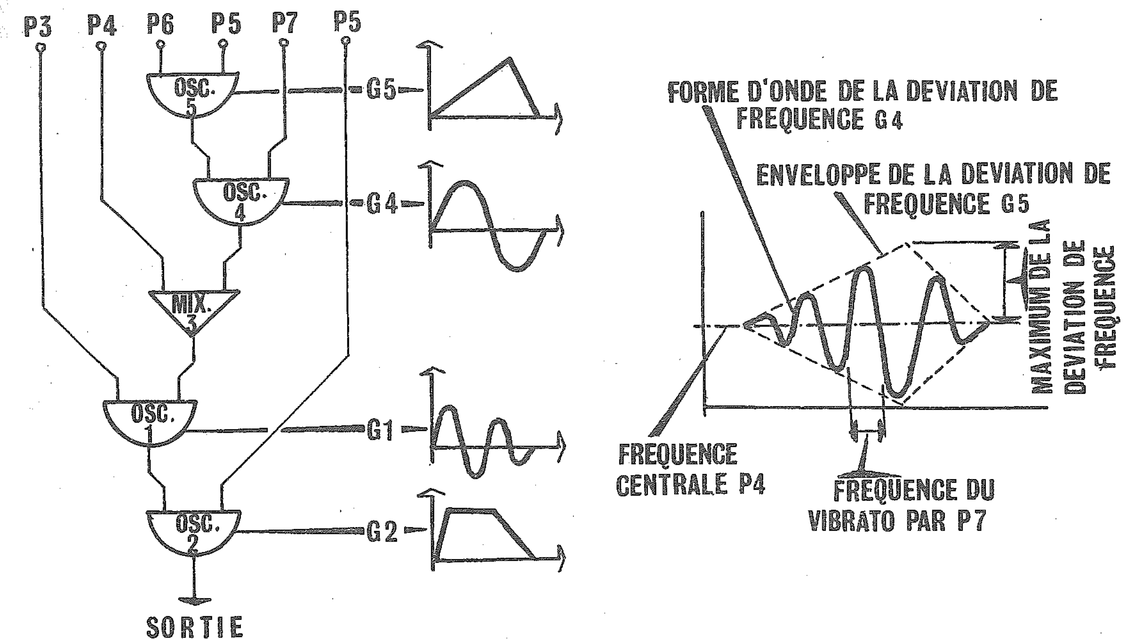


Fig. 7. — *Instrument avec vibrato.*

bloc, l'oscillateur représenté en premier sur la Fig. 4. Le paramètre P3 spécifie l'amplitude du son à générer, et le paramètre P4 sa fréquence. La fonction G 1, prélevée parmi un grand nombre de fonctions disponibles dans la mémoire de l'ordinateur, commande la forme d'onde de la sortie. Cet instrument simple produit des sons périodiques, mais d'attaque et de chute instantanées, ce qui peut provoquer des clics très perceptibles.

Pour obtenir attaque et chute contrôlées du son, on utilise l'instrument montré sur la Fig. 5. Les paramètres P3 et P4 et la fonction G 1 ont le même rôle que dans l'instrument précédent. Un second oscillateur, OSC 2, multiplie la sortie d'OSC 1. P5 étant fixé à une fréquence très basse, OSC 2 représente un cycle par note; il module la sortie d'OSC 1 avec un cycle de la fonction d'attaque et de chute G 2. Par exemple, la durée de la note étant de 0.5 seconde, P5 égalerait $\frac{1}{0.5} = 2$ Hz. (Un Hz en 0.5 seconde.)

Pour générer des bruits de fréquences réparties d'une façon aléatoire, l'instrument représenté Fig. 6 est utilisé. L'entrée P3 indique l'amplitude du bruit et P4 spécifie sa bande de passage de fréquences. L'attaque et la chute sont produites, comme précédemment, par OSC 2 avec la fonction G 2.

Enfin la Fig. 7 montre l'instrument destiné à produire un son périodique avec attaque et chute et un vibrato contrôlé. La fréquence d'entrée à OSC 1 est la somme, effectuée par MIX 3, d'une fréquence centrale indiquée par P4 et d'une fonction de variation de fréquence fournie par les oscillateurs 4 et 5. OSC 4 et G 4 déterminent la forme d'onde de la variation de fréquence, P7 spécifiant la fréquence du vibrato. OSC 5 est un autre oscillateur fixé à un cycle par seconde qui détermine l'enveloppe de la variation de fréquence. P6 indique la déviation maximum de la fréquence. Le vibrato s'effectue selon la fonction représentée, G 5.

En utilisant des fonctions différentes, le même instrument peut produire des timbres très différents. Des programmes sont disponibles pour permettre le stockage dans la mémoire de l'ordinateur d'un grand nombre de fonctions susceptibles de donner des formes d'onde très variées.

Ainsi, en combinant des générateurs-unités convenables et en utilisant les fonctions appropriées, on peut former des « instruments » capables de générer des sons très compliqués. Les paramètres de ces sons sont les données du programme, et doivent être fournis à l'ordinateur par l'intermédiaire des cartes perforées, chaque carte représentant une note et portant l'indication du numéro de l'instrument voulu et des paramètres nécessaires pour la synthétisation. Ces cartes, autrefois perforées à la main, sont maintenant faites automatiquement comme le montrera l'étude du système

GRAPHIC I. Les instructions à donner doivent donc porter d'abord sur la formation des instruments, puis sur les notes individuelles. En termes de musique conventionnelle, on établit d'abord la composition de l'orchestre, puis on écrit la partition.

Il est possible par ces moyens de produire une très grande variété de sons, et de rechercher des effets nouveaux. En voici quelques exemples : le balayage rapide de fréquences à travers plusieurs octaves dans une seule note courte; une attaque en fréquence aussi bien qu'en amplitude; l'usage d'attaque et de chute sur les paramètres du tremolo; l'usage de tremolos parfaitement synchronisés. Tous ces effets donnent des résultats sonores très intéressants.

Les principales difficultés rencontrées dans la synthétisation des sons sont du domaine psychoacoustique : la connaissance du rapport entre les propriétés de l'onde sonore et le son perçu était, au début de ces recherches, totalement insuffisante. Or il est indispensable, pour obtenir un son donné, de savoir avec précision quels sont les paramètres à fournir. Le timbre d'un instrument n'est pas une chose fixe : il change en fonction de la tessiture, de la force, de la durée, de la façon de jouer la note. Aussi a-t-il paru nécessaire d'entreprendre une étude particulière et approfondie du timbre d'un instrument classique, la trompette en l'occurrence, afin de déterminer avec le maximum de précisions quels sont les paramètres significatifs pour l'oreille.

Analyse et synthèse des sons de trompette par ordinateur

Le but principal de cette analyse était d'acquérir une meilleure connaissance des données psychoacoustiques utiles à fournir à l'ordinateur pour une synthèse correcte des sons voulus. Les résultats de l'analyse furent donc employés immédiatement pour effectuer une synthèse, ce qui permettait d'en contrôler l'exactitude en écoutant le résultat audible; de plus, en variant systématiquement un paramètre du son, on a pu évaluer la contribution de chaque paramètre à la qualité de timbre du son. Au moment où cette analyse fut entreprise, il n'existait pas dans la littérature de données sur le timbre de la trompette suffisamment précises pour permettre une synthèse correcte. Lorsque ce travail fut achevé, les sons synthétiques obtenus se sont avérés indiscernables des sons réels de l'instrument, même pour des musiciens avertis.

L'analyse fut pratiquée de la façon suivante : les sons de trompette enregistrés sur bande magnétique furent filtrés avec un filtre passe-bas à 4 000 Hz, puis convertis en séquences de nombres par la méthode d'échantillonnage précédemment décrite, avec une fréquence d'échantillonnage de 10 000 Hz. Les nombres furent enregistrés sur une bande magnétique numérale, utilisée ensuite pour effectuer l'analyse. Les programmes « Utility » furent employés pour obtenir des oscillogrammes des sons, qui fournirent les données d'entrée nécessaires pour l'analyse. Les spectogrammes sonores montrèrent que les sons de trompette consistent essentiellement en composantes harmoniques, ce qui rendit possible l'emploi du procédé d'analyse « PISA » (Pitch synchronous analysis). Les programmes PISA effectuent une analyse des signaux quasi-périodiques en séparant le signal en partiels et en calculant la série de Fourier pour chaque partiel comme si le signal était périodique.

Durant l'attaque et la chute du son, la forme d'onde change très rapidement, et les résultats de l'analyse ne sont pas tout à fait sûrs. Ils ont cependant donné des renseignements suffisants pour effectuer ultérieurement une synthèse correcte. Les diagrammes fournis par PISA montrent le tracé harmonique du son, en fonction du temps. Ils ont fait apparaître les caractéristiques suivantes :

— Forme du spectre en fréquence : on constate la présence d'un pic vers 1 500 Hz; la proportion d'énergie de haute fréquence augmente avec l'intensité du son; pour une intensité donnée, il y a une structure formantique, c'est-à-dire une enveloppe sensiblement invariante si la fréquence fondamentale varie.

— Le temps de montée global de l'attaque est de 20 millisecondes; les partiels de fréquences basses ont une montée plus rapide que ceux de fréquences élevées.

— On remarque une modulation rapide et quasi-aléatoire de la fréquence fondamentale.

La synthèse des sons fut effectuée au moyen du programme MUSIC IV décrit précédemment, les séquences de nombres étant établies d'après les données de l'analyse PISA. L'évolution des partiels, montrée par les diagrammes PISA, fut approximée par des fonctions linéaires par segments, plus ou moins complexes, et dont le rôle était de contrôler l'évolution des harmoniques dans les sons synthétiques. De 6 à 13 harmoniques furent ainsi contrôlés indépendamment les uns des autres, et confiés à différents instruments constitués avec le programme MUSIC IV. De plus, des modulations quasi-aléatoires des fréquences furent essayées; elles se révélèrent peu significatives pour l'oreille en ce qui concerne les partiels, seule la modulation de la fréquence fondamentale s'avéra contribuer à la qualité « cuivrée » du son. Pour tenir compte de la variation du spectre avec l'intensité, un « instrument » spécial a été utilisé, au moyen duquel on spécifie pour chaque son l'évolution temporelle de l'amplitude de la fondamentale à travers le son; l'amplitude des harmoniques croît régulièrement avec celle de la fondamentale, la proportion d'augmentation, c'est-à-dire la pente, étant fonction du rang de l'harmonique. Grâce à cet instrument, des sons à dynamique variable ont pu être générés. Cependant quelques sons synthétiques jugés « non naturels » ont dû être écartés.

Cette méthode de synthèse des sons de trompette est coûteuse en temps de travail et en temps d'ordinateur, et ne pourrait pas être employée pour une longue pièce de musique. Mais, en isolant les traits significatifs pour l'oreille du timbre, ces travaux ont permis une simplification de la synthèse par une sorte de « codage » des sons de trompette qui permet, sans reproduire exactement le timbre d'un instrument existant, d'obtenir d'une façon plus économique des sons cuivrés, ce qui a élargi le champ des timbres disponibles pour la musique artificielle.

Sons synthétiques et langage graphique

Les partitions conventionnelles sont peu appropriées à la description de séquences de sons pour les ordinateurs. Les expériences qui vont être décrites utilisent une entrée graphique au moyen d'un tube à rayons cathodiques et d'une « plume lumineuse ». Des programmes sont associés à cette entrée, qui est un système pratique de communication homme-ordinateur. Les partitions graphiques se sont révélées comme de très bons moyens d'exprimer les séquences de sons. Dans les programmes associés, un algèbre permet la combinaison des fonctions par addition ou multiplication; l'usage d'algorithmes fait partie du processus de composition.

Le procédé GRAPHIC I, conçu d'abord pour le dessin industriel, a été appliqué à toutes les variétés de problèmes de dessin. Son application à la musique synthétique permet au compositeur de dessiner ses partitions comme des fonctions graphiques du temps, sous forme de graphes à deux dimensions. Les tracés fournis sont automatiquement transformés en « cartes-partitions », puis en « cartes-notes » où sont perforées les indications communiquées par le compositeur sur le graphe, et les données que celui-ci a spécifiées, au moyen de la machine à écrire. Ces cartes-notes servent d'entrée à l'IBM 7094 qui utilise le programme MUSIC IV précédemment décrit; la bande numérale obtenue en sortie subit la conversion numéral-analogique au moyen de l'ordinateur PB 250, et le voltage analogique qui en résulte est filtré et enregistré sur bande magnétique, et envoyé dans un haut-parleur pour écoute immédiate. Le schéma général de ce circuit est représenté Fig. 8.

Le compositeur peut donc obtenir très rapidement l'écoute de la séquence de sons générée d'après son entrée graphique, et il lui est ainsi loisible de modifier ses graphes en fonction du résultat obtenu. C'est un système d'interaction homme-machine.

La console GRAPHIC I comporte plusieurs entrées possibles : une entrée graphique avec la « plume lumineuse », une entrée alphanumérique avec la machine à écrire, une entrée binaire avec le lecteur de cartes; l'oscilloscope cathodique correspond à la sortie graphique. Cette console comporte un ordinateur DEC PDP 65, l'oscilloscope cathodique DEC 340, une mémoire-tampon AMPEX RVQ (Fig. 9). Dans la mémoire AMPEX, des instructions stockées peuvent être décodées pour créer un tracé sur la surface de l'oscilloscope cathodique.

Le langage GRIN (GRaphical INput), destiné à la console GRAPHIC I, comporte deux questions : où et lequel. Le compositeur répond à ces questions, posées par des signes conventionnels sur l'écran, au moyen de la « plume lumineuse » pointée vers les signes appropriés, ce qui transmet au programme une information positionnelle et le choix parmi différentes alternatives d'action.

L'oscilloscope fournit plusieurs possibilités : un tracé sélectif des contenus de la mémoire AMPEX, une surface de dessin à utiliser avec la plume lumineuse et une surface de contrôle sur laquelle des segments de contrôle peuvent être tracés. Des signes conventionnels, les « boutons lumineux », lorsqu'ils sont désignés par la plume lumineuse, provoquent l'entrée à des programmes spécifiques. Ces boutons lumineux forment un langage de contrôle que le compositeur doit apprendre.

Le programme GRIN GRAPHIC I est utilisé pour les partitions graphiques; il divise la surface de dessin en deux zones : l'une est réservée aux boutons lumineux et aux messages d'instructions pour le compositeur, l'autre est une grille sur laquelle sont tracées les fonctions musicales. L'abscisse de la grille est la durée, soit en temps correspondant aux temps de la mesure traditionnelle, soit en unités de durée arbitraires. Différentes échelles de hauteur ou de force peuvent être spécifiées par le compositeur pour l'ordonnée.

Pour tracer le graphe d'une fonction, le compositeur utilise le bouton lumineux FUNCTN en pointant vers lui la plume lumineuse. Une « croix accompagnatrice » apparaît alors sur l'écran, ainsi que des instructions disant au compositeur de

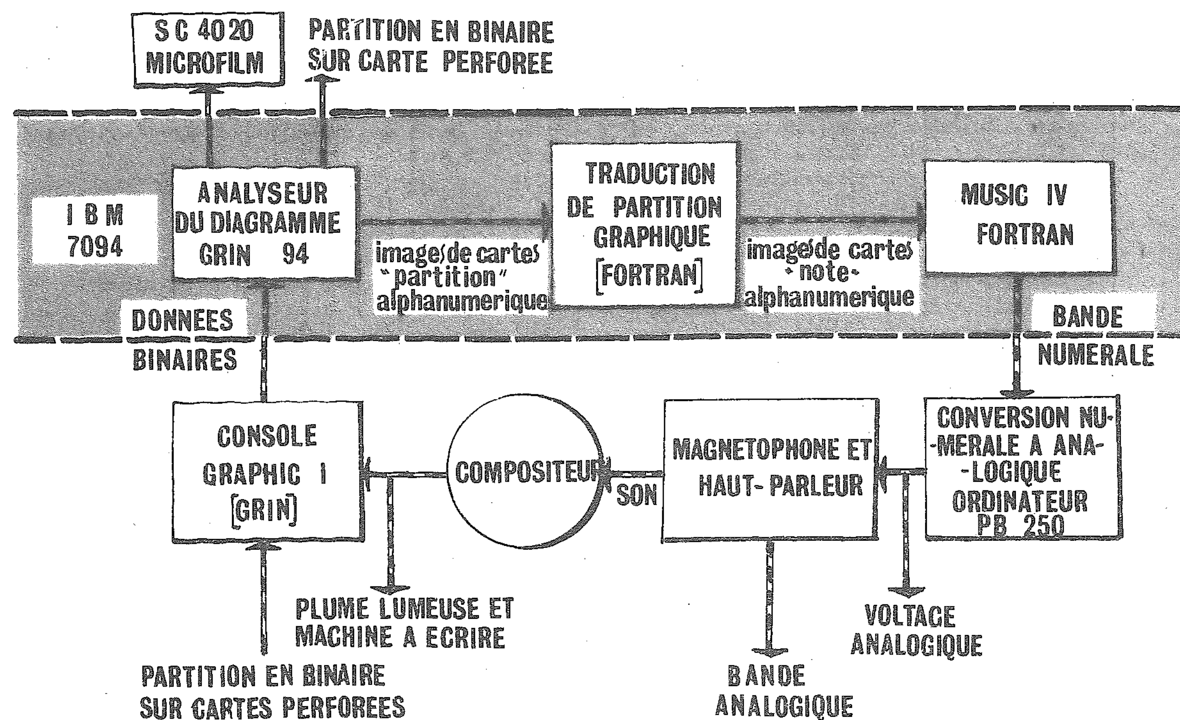


Fig. 8. — *Organisation générale du système à intéraction.*

mouvoir la croix au moyen de la plume lumineuse jusqu'au point de départ de la fonction, puis de pousser un bouton, et de fixer de la même façon les sommets successifs de la fonction. Puis il doit taper une ligne de texte descriptif, et confirmer qu'aucune erreur n'a été faite. D'autres boutons

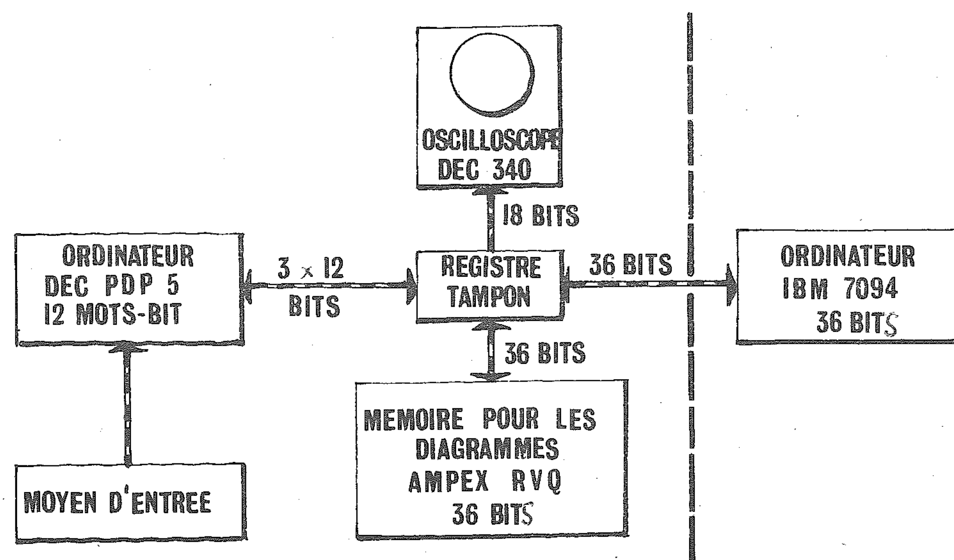


Fig. 9. — *Organisation de la console GRAPHIC I*

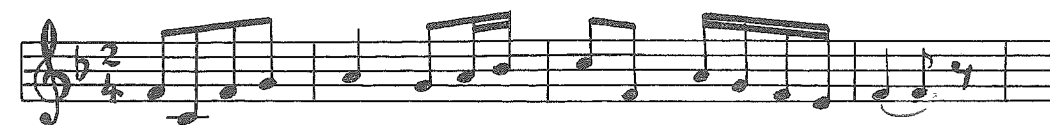


Fig. 10. — *Notation conventionnelle des quatre premières mesures de la « Marche des Grenadiers ».*

lumineux permettent de copier, d'effacer, ou de déplacer les fonctions, de déclencher l'interaction avec l'IBM 7094 pour jouer la partition, etc.

Le programme GRIN 94 est l'interaction de la console GRAPHIC I avec l'IBM 7094. Le tracé du compositeur, contenu dans la mémoire de GRAPHIC I, sert d'entrée. Deux sortes de partitions sont générées automatiquement au cours de l'interaction : une partition sur microfilm, et une copie de la partition graphique, sous la forme, lisible pour la machine, d'un tableau binaire.

Un exemple très simple de partition graphique est donné Fig. 10 et 11. La Fig. 10 montre les quatre premières mesures de la « Marche des grenadiers », écrites en notation traditionnelle. Les mêmes mesures, en notation graphique, peuvent être lues sur la Fig. 11. Quatre fonctions spécifient, de haut en bas; l'amplitude, le 2 indiquant

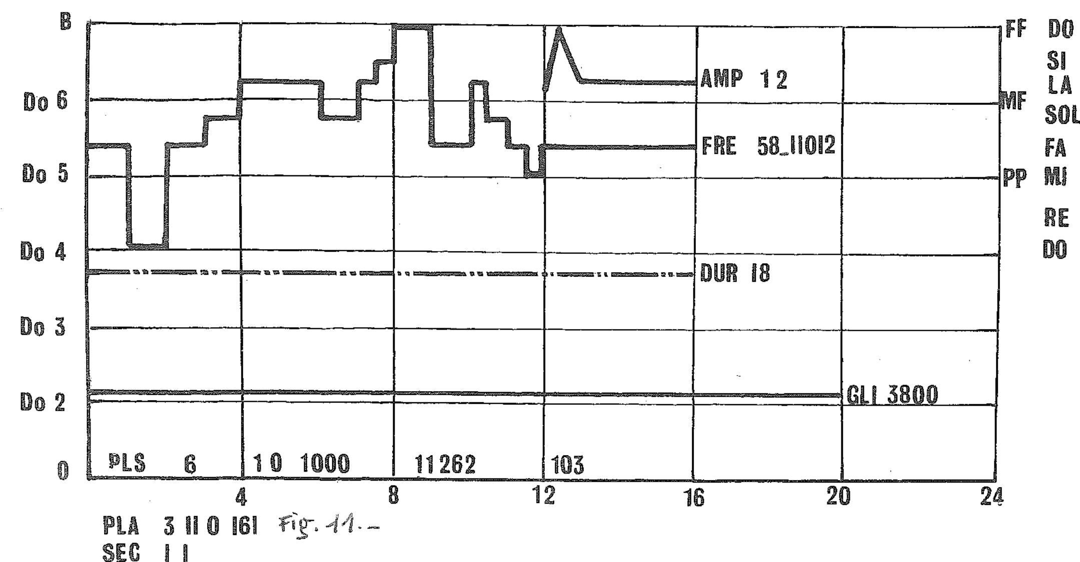


Fig. 11. –

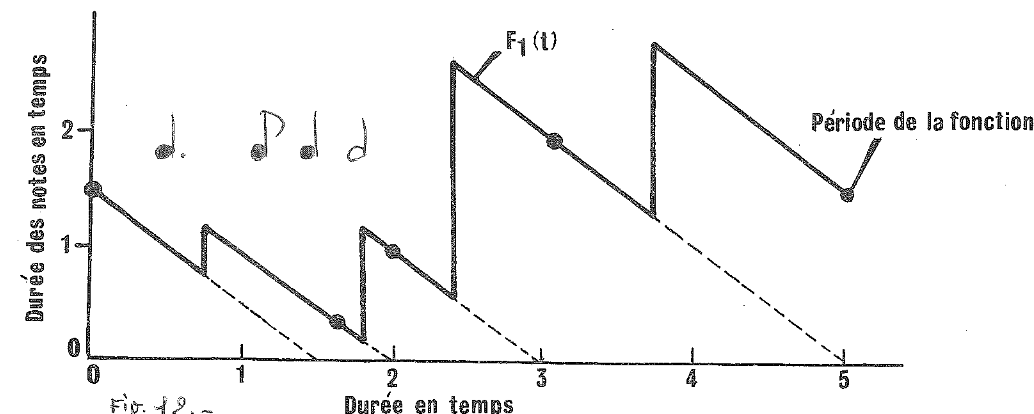


Fig. 12. –

Fig. 11. — *Notation graphique des quatre premières mesures de la « Marche des Grenadiers ».*

Fig. 12. – Représentation d'un type rythmique par une fonction continue



LA NOIRE VAUT UN TEMPS

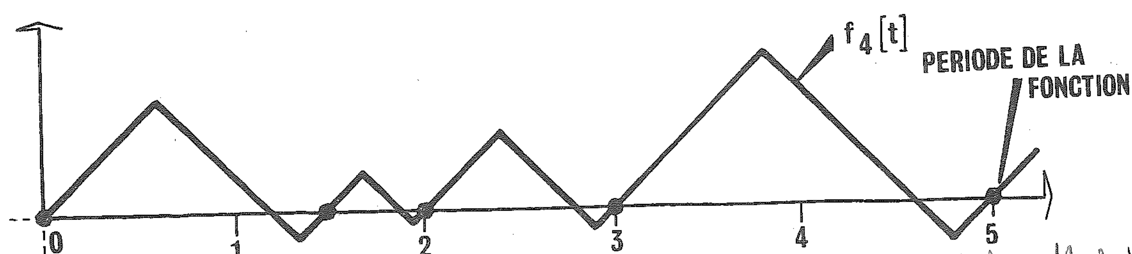


Fig. 12 bis Représentation d'un type rythmique par une fonction continue. (2de méthode)

que la fonction est longue de deux temps; la fréquence, le 8 indiquant que la fonction comporte 8 temps, — 1 correspondant au bas du graphe, DO 3, et + 1 au sommet, DO 4, établissant ainsi l'échelle située sur la droite, 12 est un nombre arbitraire étiquetant la fonction; en-dessous vient la durée, puis le glissando, non utilisé, et annulé par la spécification de sa fréquence de 0 à 0. Trois énoncés ont été tapés dans le bas du graphe : PLA précise que l'ordinateur doit jouer cette séquence sur l'instrument 11, du temps 0 au temps 16.1, ce qui provoquera une double exécution des 8 temps de la séquence. L'énoncé PLS charge une procédure spéciale de quantifier les fréquences de façon à respecter l'échelle tempérée de Fa majeur.

En complément à ce langage graphique, le compositeur a à sa disposition un algèbre qui lui permet de combiner les fonctions graphiques. Un procédé qui donne souvent des résultats intéressants est celui de la moyenne entre deux lignes mélodiques ou rythmiques, c'est-à-dire la conversion graduelle d'un type mélodique ou rythmique en un autre. Cette moyenne s'effectue de la façon suivante : les fonctions de fréquence et de durée de l'une des séquences de sons seront multipliées par une fonction qui, partant de la valeur d'une unité, décroît linéairement jusqu'à zéro; les fonctions de durée et de fréquence de la seconde séquence de sons seront multipliées par une fonction qui part de la valeur zéro et croît linéairement jusqu'à l'unité. Si les deux séquences sont tonales, la moyenne devra être quantifiée afin d'obtenir des fréquences figurant dans les gammes tempérées auxquelles appartiennent les deux fragments musicaux.

Le programme de quantification des hauteurs permet aussi d'ajuster la hauteur d'une note par rapport à la note simultanée d'une autre voix, ce qui rend possible un contrôle de la structure harmonique.

Par l'algèbre, on peut combiner des fonctions de périodes différentes; on obtient ainsi une fonction plus longue que ses constituantes; les effets produits sont intéressants.

Pour les durées, l'algèbre utilise la fonction dite d'autosynchronisation. Un type rythmique est représenté dans l'ordinateur par une fonction continue (Fig. 12). L'ordinateur génère le type rythmique voulu au moyen d'une fonction emmagasinée, $f_1(t)$, avec un algorithme qui, au départ, lit la valeur initiale de f_1, $f_1(0)$; la durée de la première note, un temps et demi, dans l'exemple donné, est obtenue, et l'algorithme, après avoir généré une note de la longueur voulue, lit la valeur de f_1 au début de la seconde note, $f_1(1.5)$, et ainsi de suite pour les notes suivantes. A la fin des cinq temps, la fonction se répète. Entre les points qui marquent la durée des notes, la fonction est linéaire par segments, et les discontinuités, arbitrairement localisées à mi-chemin entre les notes successives, sont jointes par les segments. Cette forme de fonction est auto-synchronisante : si elle est introduite à un point différent du point de départ de l'une des notes préparées, une note écourtée sera produite, et la suite de la séquence sera rééquilibrée.

Cette fonction spécifie donc la durée de la note; une autre fonction indique la portion de temps durant laquelle la note sera jouée, contrôlant ainsi le degré de legato ou de staccato.

Cette méthode de composition est dite algorithmique, les algorithmes étant parties intégrantes du processus de composition. Les outils les plus efficaces du compositeur sont les fonctions périodiques, l'algèbre pour les combiner, la fonction d'autosynchronisation pour les durées, et la procédure de quantification des hauteurs. Le compositeur contrôle la force, le tempo, le nombre de voix, l'harmonie, l'échelle employée, le degré de synchronisation ou de syncope des notes entre elles, l'instrument. Cependant, au moyen des algorithmes, beaucoup de détails concernant la génération des notes individuelles n'ont pas besoin d'être écrits; les séquences sont planifiées avec précision globalement, mais pas dans les petits détails. Les compositeurs qui ont employé le procédé décrit ont été satisfaits des résultats obtenus.

Des compositions ont été réalisées telles que SWANSONG, qui comporte sept sections utilisant de une à quatre voix, et une échelle divisant l'octave en 9 intervalles égaux, les notes employées étant la tonique, les 2/9, 3/9, 4/9, 6/9 et 8/9 de l'octave.

La composition telle qu'elle vient d'être décrite, avec les facilités offertes par l'entrée graphique, rend l'usage des ordinateurs et la génération de sons synthétiques beaucoup plus facilement accessibles aux compositeurs, une formation spécialisée approfondie n'étant plus nécessaire grâce aux programmes disponibles et à l'organisation de la console GRAPHIC I. Il semble que ce nouveau domaine ouvert à la musique depuis quelques années soit riche en possibilités d'avenir.

CHAPITRE VI

MICHEL PHILIPPOT ET LA MACHINE IMAGINAIRE

Tandis que Pierre Barbaud posait les principes de la musique algorithmique, et que Iannis Xenakis inventait la musique stochastique, Michel Philippot, qui fut lui aussi parmi les premiers en France à s'intéresser aux perspectives nouvelles ouvertes à la création artistique par les techniques d'automation et par la cybernétique, conçut, dans une optique très particulière et qui lui est tout à fait personnelle, sa « machine imaginaire ».

La machine imaginaire

Qu'est-ce que la machine imaginaire? Je suis allée trouver Michel Philippot dans son bureau de l'ORTF, et lui ai posé la question. Voici comment il définit lui-même son procédé :

« En face d'un problème donné, on essaie d'imaginer la machine et le programme qui pourraient le résoudre, en s'imposant pour première règle que la machine imaginée, qui n'existe pas dans la réalité, soit toujours techniquement réalisable à l'époque où l'on opère, car sinon ce serait de la science-fiction et non de la recherche. La machine imaginaire, c'est une contrainte mentale qu'on s'applique à soi-même, celle d'agir d'une façon séquentielle en respectant les règles qu'on a déterminées. Par exemple, prenons la question suivante : si l'on examine un choix concernant des agrégations sonores, des accords, dans quelle mesure ces agrégations sont-elles mécanisées ou correspondent-elles vraiment à l'individu, et jusqu'à quel point cela peut-il être simulé par un mécanisme? Avec un chapeau et des morceaux de carton, ou avec une table de nombres aléatoires, on peut commencer à essayer de réaliser ces agrégations de notes, puis voir si le résultat cadre bien avec ce qu'on avait voulu, et sinon chercher la règle correspondant aux changements désirés et procéder par approximations successives.

Ce procédé de la machine imaginaire, avec les complications et les raffinements qu'on peut lui apporter, est comparable, pour la recherche musicale, à ce qu'a été la machine de Turing dans la recherche logique; la machine de Turing, qui avait été conçue pour vérifier un certain nombre de propriétés logiques, pouvait résoudre les problèmes algorithmiquement solubles, c'est-à-dire pouvant être réduits à une suite d'opérations simples, répétables un nombre x de fois, et à exécuter dans un certain ordre codifié à l'avance. On fait fonctionner la machine imaginaire sur le papier en suivant un plan, une règle du jeu; si le résultat n'est pas conforme à ce qu'on voulait obtenir, on modifie les règles du jeu; si l'on a réussi à simuler un phénomène, c'est-à-dire à le fabriquer au moyen d'un mécanisme qu'on a inventé et construit, on arrive à le connaître beaucoup mieux qu'avant.

Avec la machine imaginaire, on peut faire un schéma de fonctionnement avec boucles de rétroaction pour information, etc..., qui corresponde aussi bien à la vie d'un virus qu'à celle d'une étoile, ou qu'à l'évolution d'une société. Les types de machine sont classés relativement à la manière dont elles fonctionnent et au but qu'elles poursuivent, et pas du tout relativement à leur nature.

Les problèmes doivent être bien posés : il faut définir avec précision quel sera le champ des recherches, avec le champ d'application; ce que seront le mécanisme étudié, son environnement, ce qu'on retiendra de l'environnement comme agissant sur le mécanisme intéressé. On arrive à résoudre, en cybernétique, des problèmes dont on ne connaît pas toutes les données, à la condition que l'expérimentation en soit accessible.

Beaucoup plus que faire de la musique, ce qui m'importe, c'est de voir comment elle est faite. J'ai aussi réalisé des expériences de simulation dans le domaine de la peinture (Fig. 1 et 2). Tout ce qui touche l'esthétique m'intéresse, et particulièrement de savoir quand, comment, pourquoi — et autres

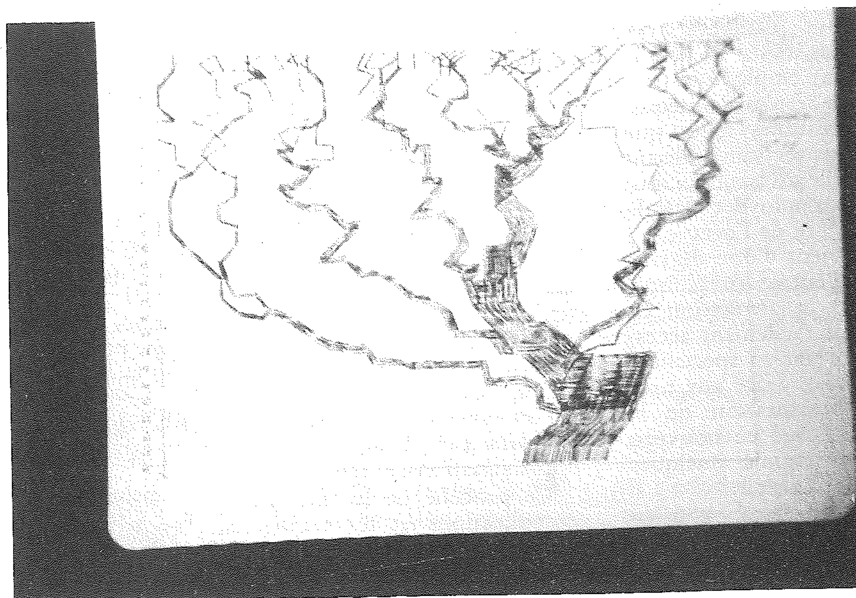


Fig. 1. — *« Arbre calculé » : calculs faits à la main, à partir d'une table de nombres aléatoires et de règles d'organisation extrêmement simples, déduits de la description d'un arbre faite par Léonard de Vinci dans ses Carnets. (1)*

questions — naît le sentiment du beau. C'est un problème ultra-complexe. »

Sur les mécanismes de création esthétique (2)

Le procédé de la machine imaginaire, que Michel Philippot a défini dans les lignes précédentes, a été utilisé dans les domaines musicaux et picturaux; son auteur l'a appliqué à l'étude des mécanismes de création esthétique. Il a construit un « schéma de la fabrication du message (œuvre) esthétique » (Fig. 3). Quelles sont dans ce domaine l'étendue et les limites de ce que l'on peut attendre des procédés de simulation et des processus d'apprentissage par simulation? Nous le verrons en reprenant les deuxième, troisième et quatrième alinéas § b, c et d) du schéma.

1. Michel Philippot précise que pour les deux expériences reproduites, le procédé de calcul est très simple (quoique très fastidieux), l'intérêt de l'expérience étant, justement, de démontrer que des objets d'apparence complexe pouvaient être le résultat d'une suite d'opérations tellement élémentaires qu'elles sont faisables par un enfant... donc par une machine... ou réciproquement!

2. Chapitre réalisé d'après « A propos des mécanismes de création esthétique » Michel Philippot extrait de « Cybernética » n° 2, 1967. Association Internationale de Cybernétique, Namur.

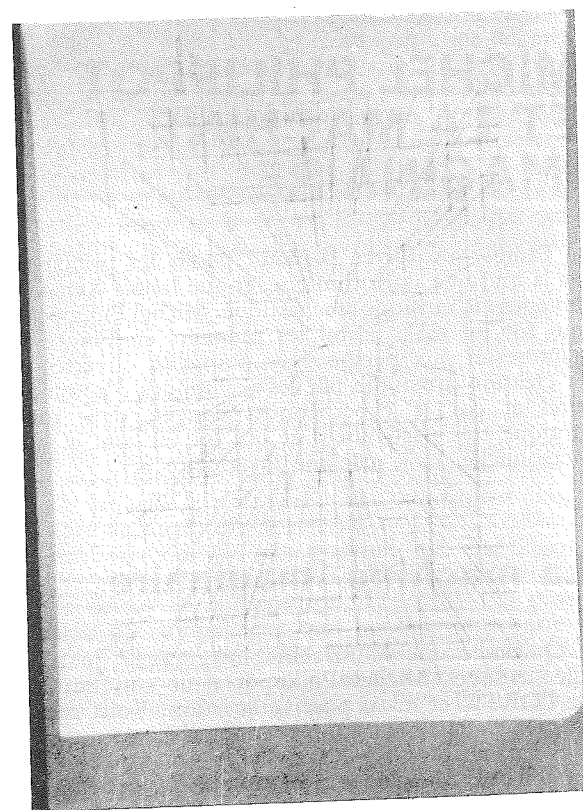


Fig. 2. — *Simulation des lois de la perspective, indépendamment de toute préoccupation figurative. (1)*

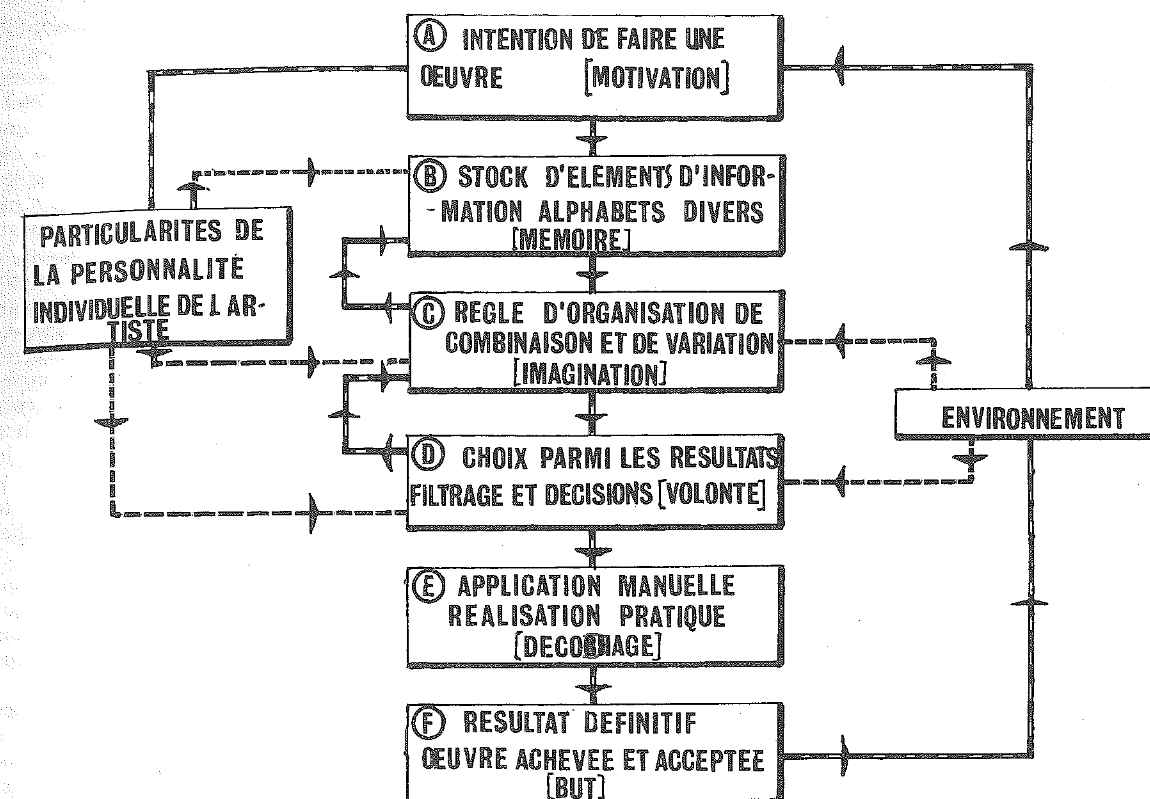


Fig. 3. — *Schéma de la fabrication du message (œuvre) esthétique.*

Le deuxième et le troisième alinéas (§ b et c), ont un point commun : ils impliquent des mécanismes dont le fonctionnement dépend de la disponibilité d'un certain stock d'informations. Cette disponibilité dépend elle-même 1° de l'existence de ce stock d'informations et de la possibilité d'y accéder, qui sont généralement l'apanage d'un contexte culturel dans lequel les éléments d'information disponibles et les règles régissant les assemblages possibles sont coutumières ou seulement acceptables; 2° de l'aptitude de l'artiste créateur à prendre connaissance du contenu de son stock d'informations et des règles d'assemblage (mémoire); et à imaginer des règles nouvelles (imagination).

Mémoire et imagination sont susceptibles d'apprentissage. Dans le cas de l'imagination, il existe des procédés de variation (méthodes d'extrapolation, d'interpolation, d'analogie, de déduction, etc.), agissant sur les syntaxes déjà existantes. Le résultat sera soumis au crible de la critique, et au filtre du choix (quatrième alinéa du schéma, § d), dont les critères sont liés à ceux d'efficacité, le jugement porté sur le message dépendant de la qualité du sentiment esthétique qu'il aura provoqué chez ses récepteurs. C'est un cas d'apprentissage par essais et erreurs.

L'étude des mécanismes de création esthétique a été volontairement limitée, les autres points étant jugés trop complexes, aux points suivants :

« *a*) choix du stock d'informations disponibles et utilisables, pour la fabrication d'une œuvre de type donné (alphabet);

« *b*) choix des règles d'assemblage des éléments d'information, ce qui implique une connaissance préalable des règles déjà admises et utilisées (syntaxe); (...)

« *c*) invention de nouvelles règles d'assemblage (imagination) à partir de modes de raisonnements définissables;

« *d*) correction, par essais et erreurs, des résultats obtenus, et choix des résultats (décision). »

La simulation permet d'obtenir des connaissances sur le message lui-même, et sur ses récepteurs (de par les tests et expériences effectués). Elle permet aussi d'espérer l'obtention de quelques lumières sur le mécanisme de fabrication du message. Le processus opératoire est le suivant :

1° choix du mécanisme à simuler (fabrication

d'un message soit pictural, soit musical), et délimitation du champ expérimental;

2° choix des matériaux utilisés pour l'expérience (ensemble d'informations visuel ou auditif);

3° limitation du nombre d'éléments d'information afin de construire « l'alphabet d'entrée » de la machine;

4° « alphabet de sortie » (identique à « l'alphabet d'entrée »);

5° étude de l'action du message sur un ou des récepteurs (au minimum l'expérimentateur lui-même) : nature et intensité des sentiments esthétiques provoqués;

6° d'après les caractéristiques des récepteurs, choix parmi les règles applicables aux processus d'assemblage des éléments d'information;

7° confrontation des résultats obtenus par la machine soumise au programme appliqué, avec ceux qu'on aurait désiré obtenir en l'absence de la machine. Essai et correction des règles d'assemblage jusqu'à l'obtention d'un message « valable » aux termes du 5°.

L'étude des messages musicaux s'est avérée plus difficile que celle des messages picturaux. Les messages musicaux font appel à différents niveaux de perception dont la hiérarchie est, grosso modo, rattachée aux divers types de mémoire.

Les différents niveaux sont : la perception des timbres ou des sons brefs (durée limitée au délai minimum de perception), celle des motifs mélodiques ou harmoniques (durée limitée à quelques secondes), et celle des formes musicales complexes (sonate, variations, etc., durée variant de quelques minutes à plus d'une heure). Ces trois niveaux existent simultanément dans un message musical « normal ».

Michel Philippot a dû, « en raison de l'immensité de la tâche à entreprendre pour arriver à une compréhension complète du phénomène musical », effectuer un choix et se limiter à l'étude des mécanismes de perception des formes musicales.

Le point de départ de l'expérience est une suite de sons répartis au hasard dans le temps. Puis vient l'introduction progressive de règles aussi précises que possible afin qu'elles soient mesurables. Enfin le message obtenu est confronté à celui qui aurait pu être obtenu sans le concours de la machine.

Le premier travail est d'opérer un prélèvement dans la masse des objets sonores disponibles pour constituer arbitrairement un alphabet, auquel seront imposées des règles d'organisation réparties dans trois classes : celle des règles portant sur la hauteur du son, celle qui organise les combinaisons de timbres, et celle qui définit les intensités, chacune d'elle réagissant sur les autres.

Diverses natures de règles furent employées au cours des expériences (enchaînements de type Markovien, procédés de variations divers tels que transformation par substitution, application d'un algorithme imité ou non de lois physiques quelconques, etc.).

Dans l'état actuel des connaissances acquises, il semble que la nature des règles soit moins déterminante que leur quantité. La recherche du point d'équilibre dans la dialectique ordre-désordre est donc, en ce qui concerne les phénomènes esthétiques, plus significative que la manière dont un ordre donné peut être obtenu. Une constatation semblable a été faite dans le domaine pictural : le sentiment esthétique y prend naissance à partir d'un certain excédent d'informations, le message parfaitement intelligible, uniquement sémantique, étant généralement totalement dépourvu d'efficacité esthétique. Le message désordonné, par contre, est dépourvu de valeur sémantique, mais peut avoir un potentiel esthétique; ceci montre que chez l'artiste, le désordre joue un rôle important dans le cadre de la dialectique ordre-désordre.

Voici, exprimée par une suite de questions et de réponses, la position exacte adoptée par Michel Philippot au cours de ces travaux :

« 1° Croyez-vous que la machine puisse remplacer l'homme dans son activité d'artiste (créateur de formes esthétiques)? Non, du moins pas dans l'état actuel de nos connaissances; mais, par prudence, évitons le non catégorique.

« 2° Croyez-vous que la machine puisse aider l'homme dans cette activité? Oui, dans la mesure où l'homme parvient à maîtriser un instrument plus puissant, plus efficient que ceux dont il disposait auparavant.

« 3° Pensez-vous que l'homme, avec machine, soit plus intelligent que sans machine? Oui, pour deux raisons : la première est que la machine l'oblige à penser; la deuxième est qu'il pense mieux, de même qu'il soulève davantage lorsqu'il dispose d'un levier. Comme le levier qui n'augmente pas sa force, la machine n'augmente pas son intelligence mais son efficacité.

« 4° Pensez-vous que la machine puisse être un objet d'enseignement? Oui, parce que grâce au procédé de simulation qu'elle nous permet d'imaginer, nous sommes en mesure, mieux que par l'introspection, de vérifier un grand nombre de processus mentaux, inaccessibles autrement. Ce dernier « oui » devant être nuancé par la nécessité de ne jamais déduire, d'une similitude fonctionnelle, une identité structurelle. »

Musique et Mathématiques (1)

Michel Philippot, partant du principe qu'il est possible de faire de la musique avec des mathématiques, a examiné les différentes tentatives de rapprochement entre musique et mathématique. Pour que cette démarche soit claire, il fallait d'abord que l'auteur précise ce qu'il appelle musique :

« Nous déciderons d'appeler (...) « musique » une organisation du monde sonore telle que : 1° cette organisation représente pour l'auditeur une forme (Gestalt) *perceptible,* c'est-à-dire ne lui paraisse pas être seulement le résultat du hasard; 2° sa perception soit accompagnée d'un plaisir sensible ou (et) intellectuel ou (et) affectif. Nous ajouterons que si pour un auditeur, fût-il seul de son espèce, une organisation sonore satisfait à ces deux conditions, il s'agira de musique, pour cet auditeur au moins. »

Ceci étant posé, Michel Philippot distingue deux cas différents de rapprochement entre musique et mathématique.

Le premier cas correspond en gros à l'attitude dite pythagoricienne, qui confère aux mathématiques un sens presque métaphysique ayant pour base une foi presque absolue en la « perfection des nombres et des proportions ». La notion de forme est liée à celle d'ordre, et la notion de hasard à celle de désordre. Construire une forme, ce peut être, pour le compositeur, faire émerger du désordre (la totalité des possibles musicaux, c'est-à-dire le hasard), un niveau d'ordre convenable (c'est-à-dire une forme). Les aspects quantitatifs de ce niveau d'ordre sont depuis peu étudiés par les théoriciens de l'information.

Si un schéma mathématique, arithmétique ou logique exprime, par rapport à un ensemble quelconque d'êtres mathématiques, de nombres ou de propositions, un ordre perceptible, il peut être possible de projeter cet ordre, au moyen d'une correspondance biunivoque ou univoque, dans l'univers sonore (application d'un ensemble dans ou sur un autre ensemble). Le second ensemble jouira d'un ordre de niveau équivalent mais de nature différente. Une version moderne du pythagorisme pourrait donc se traduire par la proposition suivante : « Tout ordre est transposable d'un domaine dans un autre sans perdre sa faculté d'être perceptible s'il l'était dans le domaine d'origine. » Ceci est une hypothèse, qui peut être illustrée par le fait suivant : si l'on passe du domaine visuel au domaine auditif dans l'alphabet morse (c'est-à-dire si l'on regarde, puis l'on écoute des points et des traits), la quantité d'informations n'est pas modifiée. Mais ce qui est évident dans le domaine du morse ne l'est pas forcément dans d'autres domaines, où il y a un nombre des signes beaucoup plus considérables.

Une forme perceptible (première condition établie dans la définition de la musique adoptée par Michel Philippot au début de ces réflexions) est généralement obtenue par l'assemblage d'éléments selon certaines règles, la perception de cette forme pouvant être subordonnée aux règles d'assemblage et non à la nature des éléments. Ces règles peuvent donc être de nature statistique, régissant globalement l'organisation de l'ensemble tout entier, au lieu de s'appliquer préférentiellement aux enchaînements de tel élément déterminé à tel autre.

La démarche de Xenakis, qui a appliqué à des structures sonores des lois tirées des mathématiques ou de la physique, s'inscrit dans cette ligne. Il a mis au point une technique qui lui permet de faire sa propre musique, c'est une démarche très intéressante particulièrement sur le plan de la composition.

Le deuxième cas de rapprochement entre mathématique et musique implique une attitude différente : l'attention s'y porte sur le mécanisme de la logique plutôt que sur les objets auxquels on l'applique. Le but est d'arriver à une explication du phénomène musical, ou à sa connaissance, par l'étude de ses mesures et de ses lois; il s'agit de « s'efforcer de découvrir les règles qui régissent la structure de l'objet esthétique, d'en donner éventuellement une expression mathématique, d'en tirer un modèle permettant une vérification logique ou expérimentale ». C'est une tentative d'esthétique mathématique.

Illustrant cette attitude, les travaux de Pierre Barbaud sont très importants du point de vue de la rigueur et de la discipline de l'esprit. Il a réussi à mettre au point un langage formalisé qui montre qu'en effectuant les recherches voulues, n'importe quel langage musical est formalisable, ce qui est considérable au niveau de la recherche.

Dans cette optique, les mathématiques sont un moyen à connaître le mieux possible, afin d'utiliser leur puissance pour expliquer, ce qui s'est fait dans le passé, ce qui se fait dans le présent, et, à partir de cette connaissance du passé et du présent, pour tenter d'évaluer les probabilités du futur.

Musique et machines (1)

Michel Philippot considère que l'usage des ordinateurs, tel qu'il est pratiqué par Pierre Barbaud ou par Iannis Xenakis, constitue un « recours au pouvoir créateur de la complexité ». En fournissant un tableau de données, un algorithme, une structure abstraite, à la machine, celle-ci fait l'apport de ses facultés d'exploration rapide d'un grand nombre de possibilités, de stockage des données

1. Ce chapitre contient de nombreux extraits de « La certitude et la foi » Michel Philippot La Revue Musicale, 7, place Saint-Sulpice, Paris-6e, carnet critique n° 257. Ianis Xenakis et la musique stochastique (1963).

1. Chapitre tiré de « La musique et les machines » Cahiers d'études de radio-télévision nos 27-28. Situation de la recherche, Flammarion éditeur, 1960.

dans les mémoires, de comptabilité et de choix systématique des résultats. C'est ce que les cybernéticiens appellent un amplificateur d'intelligence.

L'intelligence peut se ramener, théoriquement, à un petit groupe de fonctions : mémoire, imagination et association d'idées, auquel on peut en principe faire correspondre conservation mécanique, probabilités, et choix ou sélection. La conservation, l'aléatoire et le pouvoir de sélection pouvant être amplifiés, l'expression « amplificateur d'intelligence » semble justifiée. Toutefois il s'agit d'une analogie, qui est d'un emploi fructueux, mais non de similitudes, car les mécanismes cérébraux et nerveux sont fondamentalement différents des mécanismes artificiels.

Si l'on admet comme l'une des conditions d'une définition de la musique qu'elle présente pour l'auditeur une forme perceptible, on peut dire que toute contrainte, dans la mesure où elle s'oppose au désordre, au chaos sonore, est indispensable à toute musique. Pour l'ordinateur, ces contraintes se traduisent par des règles d'exclusion ou d'obligation. L'ordre est codifiable en règles d'obligation et d'exclusion, et mesurable approximativement au moyen des méthodes de la Théorie de l'Information.

Les techniciens du calcul des Probabilités sont des gens qui veulent « détruire le hasard pur en découvrant, dans l'aléatoire, tout ce qui peut être considéré comme prévisible, et cela le plus rigoureusement possible ». On peut distinguer un hasard « pauvre » et un hasard « riche » (François Le Lionnais). Le hasard dit pauvre comporte très peu d'éléments en regard de la loi des grands nombres. Le hasard « riche » semble « concourir à une finalité relative, tendre vers un but. Cela est clair si on prend l'exemple de la touffe d'herbe où chaque brin, pris individuellement, a un comportement imprévisible, mais obéit à des lois qui font que l'ensemble ne ressemble à rien d'autre qu'à une touffe d'herbe. De tels processus aléatoires sont dits stochastiques ».

CHAPITRE VII

GOTTFRIED MICHÆL KOENIG

Gottfried Michael Kœnig est directeur artistique du studio de musique électronique de l'université d'Utrecht. Son programme PROJET 1, pour le calcul par ordinateur de structures musicales, fut conçu en 1964 et essayé dans sa première forme à l'université de Bonn. La forme définitive de ce programme est écrite en ALGOL 60, pour l'ordinateur ELECTROGICA X8; PROJET 1 permet d'obtenir nombre d'œuvres différentes; l'auteur a jusqu'à présent tiré de ce programme deux « versions » réalisées en partition (Fig. 1).

Projet 1 — Généralités

PROJET 1 comprend 6 blocs, un pour chacun des paramètres pris en considération, c'est-à-dire timbre, rythme, hauteur, séquence, registre d'octave, et dynamique.

Le programme est basé sur un système de séries de longueur et de type différents; ces séries, appliquées à chaque paramètre (à l'exception de séquence), sont de type apériodique, c'est-à-dire comportant le maximum de variation du paramètre intéressé, ou périodique, c'est-à-dire atteignant le maximum de similitude pour les éléments du paramètre en question. Le passage de l'apériodicité à la périodicité se fait graduellement, au moyen d'une division de chaque bloc en 7 sections.

Dans la section 1, l'exclusion des répétitions s'étend à tous les éléments d'un paramètre.

Dans les sections 2 et 3, cette exclusion se limite de plus en plus à l'occurrence de petits groupes d'éléments.

Dans la section centrale 4, un compromis entre les deux principes est recherché : la section est divisée en « proposition » (P) et « correction » (C); à chaque série P d'un type donné correspond obligatoirement une série C de même longueur et de type opposé.

Dans les sections 5 à 7, des ordres de répétition produisent des groupes d'éléments similaires de grandeur croissante.

Outre le programme principal, PROJET 1 utilise deux sous-programmes, ALEA et SERIES.

Le sous-programme aléatoire ALEA, muni d'un nombre de départ inférieur à 1 mais égal ou supérieur à zéro, fournit à l'appel un nombre entier pris entre deux limites.

Le sous-programme aléatoire SERIES fournit un nombre entier pris entre deux limites, mais avec répétition évitée : le nombre ne réapparaîtra pas avant que tous les nombres entre les limites données aient été trouvés.

Le compositeur doit fournir les données suivantes : le nombre, fixé à son gré, de points dans le temps, qui sont des laps de temps provenant de la division d'un moment plus long en parties. Les points dans le temps sont marqués par des accords dont le volume varie de 1 à 6 sons. Une liste standard de 6 tempi métronomiques doit être fournie, ainsi qu'une liste de 28 délais d'entrée. Le délai

Fig. 1. — *Fragment de la « Version 1 ».*

d'entrée est la distance entre les points d'entrée de 2 sons. La durée du son est indépendante de cette distance; si elle est plus courte que l'intervalle de temps séparant les points d'entrée des 2 sons, un silence d'une longueur appropriée complètera la distance; si elle est de même longueur, le deuxième son commencera à la fin du premier; si elle est plus longue, il y aura superposition des deux sons. Le délai d'entrée est mesuré en fractions d'une unité métrique (la noire par exemple) à laquelle se réfère le tempo métronomique.

Chaque bloc dans le programme principal est formé d'un embranchement et de sept sections; l'embranchement permet de sélectionner l'une des sections (Fig. 2).

Timbre

Le nombre d'éléments du bloc timbre est fixé à 9. Les nombres apparaissant à la sortie peuvent être interprétés par le compositeur à son gré. Dans la version 1 faite par G. M. Kœnig, chacun des 9 chiffres représente une combinaison déterminée d'instruments — 6 au maximum — pris dans l'ensemble.

Le sous-programme APER produit à chaque appel au moyen de SERIE, une série d'éléments non répétés, qui sont stockés dans un tableau d'impression. Un compteur en contrôle le nombre dans la section de l'œuvre, et dirige ensuite le cours du programme vers le paramètre suivant, rythme.

Le sous-programme PER produit à chaque appel un groupe d'éléments similaires.

APER est utilisé dans les sections 1, 2 et 3, PER dans les sections 5, 6 et 7. La section 4 nécessite l'emploi des deux sous-programmes.

Rythme

Pour chaque section, un tempo est sélectionné au moyen de SERIES, et le nombre de séries ayant même tempo (au maximum 4) est fixé grâce à ALEA. Les éléments de la série sont sélectionnés aléatoirement dans la liste, employée complètement ou partiellement, des délais d'entrée.

Le sous-programme REST sélectionne avec ALEA une des trois sortes de silences (court, moyen ou long) chaque fois que le nombre voulu de séries ayant même tempo a été établi; avec SERIES il sélectionne un nouveau tempo, et avec ALEA un nouveau nombre de séries ayant même tempo.

Le sous-programme CHECK, au moyen d'ALEA, fixe le volume (nombre de sons le composant) d'un accord pour chaque délai d'entrée, contrôle le nombre d'éléments dans la section de l'œuvre et dirige le cours du programme vers le paramètre suivant, hauteur. Le volume de l'accord est d'autant plus limité que le délai d'entrée est court.

Hauteur

L'harmonie est basée sur une série variable de douze sons, elle-même divisée en quatre groupes de trois sons; chaque série est constituée de douze sons différents.

Il est tenu compte, pour chaque point dans le temps, du volume de l'accord calculé dans le bloc précédent; les répétitions de sons dans un accord sont évitées, car s'il comporte plus de sons qu'il n'en reste dans la série en cours, une autre série est entamée.

Pour les trois premières sections, l'exclusion des répétions s'étend à 12, 8 et 4 séries. Le sous-programme APER est appelé pour chaque série, qui se trouve donc ainsi constituée de douze éléments différents.

Pour les sections suivantes, il est effectué aléatoirement un choix entre sons, groupe ou séries.

Sons. Les sons isolés sont produits par le sous-programme TONE avec SERIES. Le son sélectionné reste le son initial de plusieurs accords, les autres sons qui les composent étant obtenus par le sous-programme GENERATOR et transférés dans le tableau d'impression.

Groupe. Si une décision a été prise pour groupe, un des groupes de trois notes de la série variable est répété, dans une transposition obtenue au moyen de SERIES, autant de fois qu'il le faut pour avoir le nombre requis de groupes, sans tenir compte du volume des accords.

Séries. Même processus que pour les groupes.

Le sous-programme GENERATOR produit des séries de douze sons ou des groupes, selon les règles suivantes :

Un groupe de trois notes consiste en :
2 de mineure, 3 ce majeure ascendantes, ou
2 de mineure, 3 ce majeure descendantes, ou
2 de mineure, 3 ce mineure ascendantes, ou
2 de mineure, 3 ce mineure descendantes.

Quatre groupes de construction similaire forment une série, les transpositions des groupes 2 à 4 étant calculées pour éviter les répétitions de sons.

SEQUENCE. Pour chaque accord, SERIES est utilisé à sélectionner autant de nombres que l'accord a de sons.

Registre en octave. Le nombre des éléments est quatre. Les nombres apparaissant à la sortie peuvent être interprétés par le compositeur à son gré.

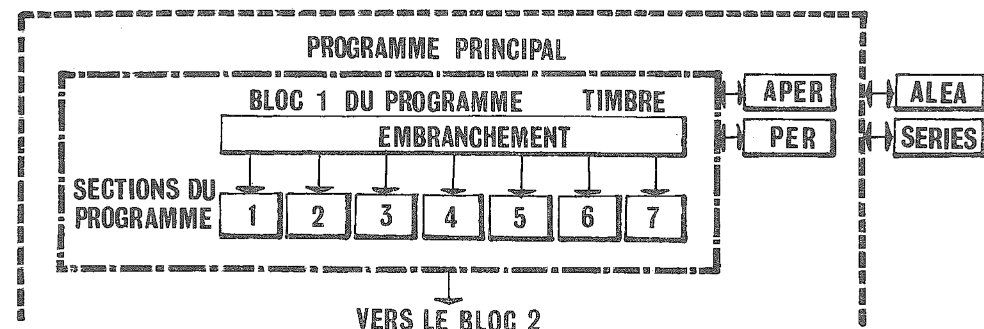


Fig. 2. — *Bloc 1 du programme principal.*

APER produit des séries apériodiques au moyen de SERIES (limites de la série = volume de l'accord) et contrôle les points dans le temps dans la section de l'œuvre.

PER produit des groupes d'éléments similaires (quantité d'éléments dans le groupe = volume de l'accord).

Le sous-programme VALUE fixe le nombre des groupes d'éléments similaires pour les sections de programme 5, 6 et 7.

Dynamiques

Le nombre d'éléments est 8 : PPP, PP, P, MP, MF, F, FF, FFF.
Une valeur dynamique par points dans le temps est déterminée.

APER sélectionne un des huit éléments au moyen de SERIES et contrôle les points dans le temps dans la section de l'œuvre.

PER sélectionne un des huit éléments et l'accumule selon les limites du groupe.

Programme d'impression

L'impression des résultats se déroule selon le schéma suivant : au début de chaque section de l'œuvre, les sections de programme sélectionnées sont énoncées pour chaque paramètre (excepté séquence).

Les points dans le temps viennent ensuite, ligne par ligne, avec les précisions suivantes :
numéro du point dans le temps,
timbre,
tempo (si nécessaire),
délai d'entrée,
silence (si nécessaire),
hauteurs dans l'accord,
séquence (nombre de chiffres = volume de l'accord),
registre d'octave (nombre de chiffres = volume de l'accord),
dynamiques.

Des symboles ultérieurs indiquent le début d'une nouvelle série dans chaque paramètre, et, dans la section 4 du programme, le début des séries P et des séries C.

Travaux en cours et réflexions

G.M. Koenig travaille actuellement à la mise au point d'un 2e programme de composition de musique instrumentale par ordinateur, PROJET 2. Ce programme comportera une sortie sous forme de notation musicale simplifiée, et une de ses particularités sera l'existence d'une version didactique. Le compositeur considère les programmes Projet 1 et Projet 2, bien qu'indépendants et significatifs en eux-mêmes, comme travaux préparatoires à la production de sons par synthèse artificielle. « L'ordinateur offre la possibilité de composer le son même par ses propriétés différentes, de sorte qu'une idée musicale apparaît comme « son » au lieu de se combiner comme jusqu'à présent en sons »[1].

Dans l'article qu'il a publié dans « le Monde de la musique »[2], G.M. Koenig résume d'intéressantes réflexions sur les rapports du compositeur et de l'ordinateur. Nous reproduisons ici quelques extraits de cet article.

« L'imagination ne crée pas seulement de nouveaux objets artistiques, mais aussi de toujours

1. Lettre à Nicole Lachartre, 17-7-68.
2. A propos de l'ordinateur dans la musique. « Le Monde de la musique », n° 3, 1967. VOL. IX. Éd. Barenreiter, 19 *bis*, rue de Vanves, Boulogne-sur-Seine.

nouvelles combinaisons des mêmes objets. (...)

« Le compositeur qui, dans un certain nombre de ses œuvres, analyse les accords et associations d'accords qui reviennent fréquemment, découvre nécessairement des constantes qui pourraient constituer ensemble sa théorie personnelle de l'harmonie. Il en est naturellement de même pour la mélodie, le rythme, l'instrumentation et divers autres domaines. (...) On peut se demander seulement quelles sont dans la composition les fonctions des décisions d'habitude et dans quelle mesure on peut les extrapoler. Il appartient à chaque compositeur de répondre à cette question. (...)

« Rares sont les compositeurs enclins à schématiser leur travail mais s'ils sont par simple curiosité contraints de le faire, ils tenteront de composer au moyen d'un ordinateur. (...) La vitesse à laquelle l'ordinateur effectue les calculs permet au compositeur de dominer des relations qu'il n'osait pas même imaginer jusque-là, pour des raisons de temps, d'économie du travail, de dépenses « bureaucratiques »; elle lui permet de choisir, entre toutes les constellations imaginables, celles qui s'approchent le plus de son objectif esthétique, ou de comparer plusieurs versions et de choisir celle qui lui paraît la meilleure. (...) Le mode de fonctionnement de la machine, l'analyse la plus détaillée des exigences et des dépendances, les plus vastes possibilités offertes et aussi, naturellement les restrictions qui en découlent, ne laissent pas d'influencer la technique de la composition et la conception esthétique. (...)

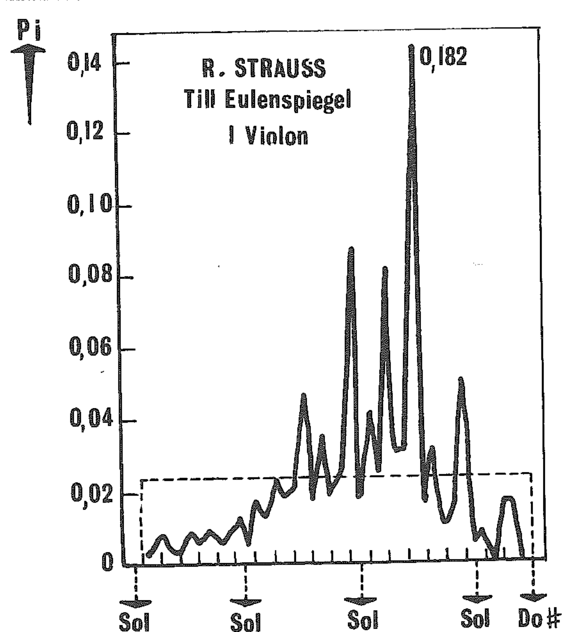
« Ainsi, l'ordinateur peut indiquer au compositeur quels sont les effets réels des règles et de quelle latitude il dispose pour les décisions qu'il doit encore prendre, parfois même à l'encontre du contexte existant — ce qui permettrait de lui assigner un rôle dans l'enseignement de la composition. »

En utilisant l'ordinateur comme moyen d'expérimentation permettant de rechercher la portée générale d'un problème, d'échapper au cadre tout fait des structures familières et d'explorer toutes les possibilités de combinaisons, G.M. Koenig a su trouver, dans ses expériences de composition automatique, l'occasion d'une réflexion constructive sur ce qu'est la composition musicale.

CHAPITRE VIII

WILHELM FUCKS ET L'ANALYSE STATISTIQUE DE LA MUSIQUE

Les travaux d'analyse mathématique du professeur Fucks ont pour base l'étude de la répartition des hauteurs et des intervalles, et celle de la corrélation entre notes voisines ou séparées par n notes, ceci dans une séquence considérée comme représentative de l'ensemble d'une œuvre musicale donnée. En appliquant cette méthode d'analyse à un grand nombre d'œuvres différentes, d'époques variées, de la Renaissance à nos jours, l'auteur recherche une approche mathématique du phénomène de la création musicale et de l'évolution des styles à travers les siècles. Les expériences citées ici ne représentent qu'une petite partie de celles réalisées par le professeur Fucks.



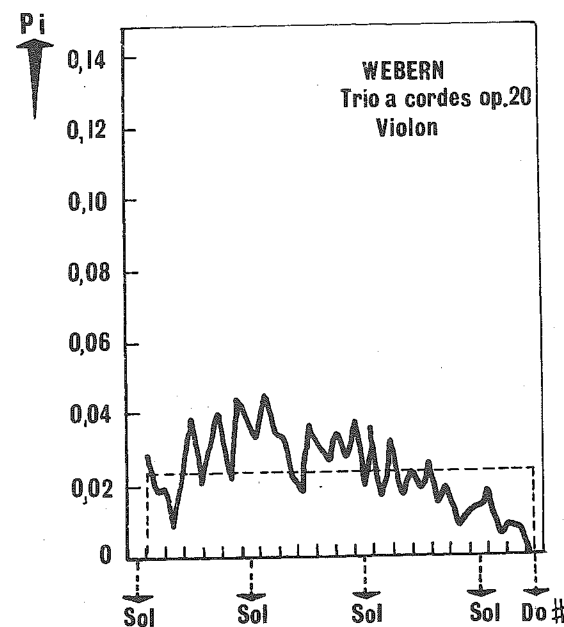
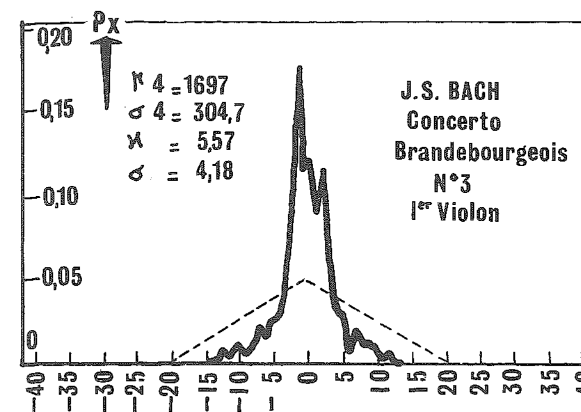


Fig. 1. — *Distribution pi des fréquences d'occurrence des hauteurs.*



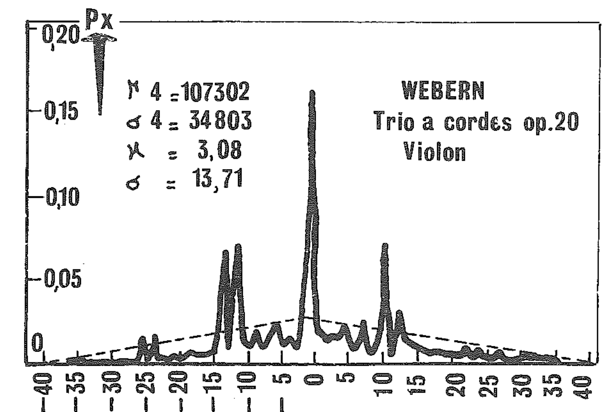


Fig. 2. — *Distribution px des fréquences d'occurrence des intervalles.*

Étude des propriétés statistiques de la musique

Les calculs sont effectués sur une séquence de n éléments (notes), tirée de la partie de premier violon des œuvres citées.

Le professeur Fucks examine d'abord la distribution p_i des fréquences d'occurrence des hauteurs; les œuvres étudiées étant le concerto pour deux violons en RE mineur de J.-S. Bach, Till Eulenspiegel de Strauss, le trio à cordes op. 20 de Webern et la Suite Lyrique de Berg (Fig. 1), les résultats sont comparés avec ce que donnerait une fréquence de distribution avec équiprobabilité d'occurrence des éléments (en pointillé sur la figure). Il est remarque que les fréquences de distribution des hauteurs sont, chez Berg et Webern, beaucoup plus proches de la distribution aléatoire que chez Bach et Strauss.

Ensuite l'auteur calcule l'écart-type des hauteurs pour 29 œuvres, allant de 1500 à 1960. L'écart type ou écart quadratique moyen mesure la dispersion autour de la valeur moyenne $\bar{I}$. Plus il est grand, plus les valeurs de i sont dispersées autour de $\bar{I}$.)

De 1500 à nos jours, cet écart-type croît régulièrement, d'une valeur de trois environ à une valeur de treize environ, ce qui montre la dispersion croissante des hauteurs autour de la moyenne. Les valeurs de l'écart-type pour les hauteurs sont réparties de la façon suivante :

	pré-baroques	: entre 3.30 et 4.60
	baroques	: entre 4.70 et 6.20
	classiques	: entre 6.85 et 7.80
	romantiques	: entre 7.35 et 10
modernes	non sériels	: entre 7.85 et 9.45
	sériels	: entre 9.35 et 13

Ensuite a été calculée la distribution p_x des fréquences d'occurrence des intervalles entre sons consécutifs, pour le concerto brandebourgeois n° 3 de J.-S. Bach, le quatuor à cordes opus 74 de Beethoven, Till Eulenspiegel de Strauss, et le trio à cordes opus 20 de Webern. Des courbes montrent la fréquence d'occurrence p_x des intervalles de x demi-tons, $x > 0$ indiquant un intervalle ascendant, $x < 0$ un intervalle descendant, et $x = 0$ une note répétée (Fig. 2).

Pour étudier des caractéristiques stylistiques indépendantes de l'étendue de la tessiture, il faut rechercher une fonction de la distribution des intervalles qui ne dépendent pas, ou seulement très faiblement, de la dispersion. Cette fonction sera la curtosis $\varkappa$, qui prend la valeur 3 pour toutes les distributions gaussiennes, indépendemment de l'écart-type.

La grandeur statistique $\varepsilon = \overline{\varkappa - 3}$ (excédent), prend la valeur — 0.6 pour une distribution avec équiprobabilité de toutes les notes.

La Fig. 3 montre un tableau de l'évolution de la valeur de ε dans la musique, de 1530 à 1960. On peut faire au sujet de ce tableau trois remarques :

1° accroissement régulier de la valeur de ε, de 2.1 à 12.1;

Époque	Compositeur	Œuvre	$\varkappa$ - 3
	Modena	Fantaisie	
1530-1650	Willaert	Fantaisie	2,1
	Palestrina	Ricercare	
	Purcell	Suite	
	Corelli	Conc. grossi 1 et 8	
1680-1740	Vivaldi	Conc. grossi 2 et 8	3,1
	Bach	Conc. Brand. 3	
	Hændel	Conc. grosso RE	
	Haydn	Symphonie Oxford	
1780-1825	Mozart	Symphonie jupiter	7,5
	Beethoven	Symph. 1, 3, 5, 6, 8	
	Schumann	Symph. 2 et 3	
	Brahms	Symph. 1 et 3	
1846-1900	Strauss	Till Eulenspiegel	10,4
	Swetana	Moldau	
	Tchaïkovsky	Symph. 5 et 6	
	Prokofief	Symph. 5	
	Ravel	Boléro	
1900-1950	Hindemitt	Mathis le peintre	12,1
	Chostakovitch	Symph. 5 et 9	
	Bartok	2e suite	
	Schœnberg	Quatuor à cordes op. 30	
		Variations pour orch.	
		Concerto pour violon	
	Webern	Trio à cordes op. 20	
		Bagatelle	
1922-1960		Quatuor à cordes op. 5	3,5
		Quatuor à cordes op. 28	
	Berg	Suite lyrique	
		Concerto pour violon	
	Nono	Varianti	
	Boulez	Le marteau sans maitre	
	Stockhausen	Gruppen pour 3 orch.	

Fig. 3. — *Tableau de l'évolution de la valeur ε dans la musique européenne.*

2° éclatement de cette tendance dans la période moderne : l'école atonale atteint le niveau 12.1, tandis que pour la musique dodécaphonique et sérielle, ε prend la valeur de 3.5;

3° les valeurs de ε sont du même ordre de grandeur dans la musique ancienne (pré-baroque et baroque), et dans la musique dodécaphonique et sérielle.

Après avoir étudié les caractéristiques des fréquences de distribution des hauteurs et des intervalles, le professeur Fucks examine la disposition des divers éléments dans une séquence au moyen de corrélogrammes, ceci afin de pouvoir déterminer quantitativement la proportion de hasard contenue dans une œuvre musicale.

L'auteur prend une séquence de n éléments, et considère successivement chaque élément de la séquence avec son voisin, puis celui d'après le voisin, etc..., les éléments (x; y) des paires ainsi obtenues étant séparés par k intervalles (y compris $k = 0$, ce qui implique $y \equiv x$). Une formule donne la corrélation r_k, et les propriétés corrélatives d'une séquence sont représentées par le corrélogramme $r_k = f(n; k)$; $k = 0, 1, 2...$; $n > k$.

Autrement dit la corrélation est étudiée entre notes séparées par 0, 1, 2... notes intermédiaires.

Des corrélogrammes ont été établis pour des séquences extraites du concerto pour deux violons en RE mineur de J.-S. Bach, du quatuor à cordes opus 74 de Beethoven, et du trio à cordes opus 20 de Webern, pour $n = 500$ et la valeur de k supérieure à 20, c'est-à-dire que la corrélation est étudiée entre notes séparées par jusqu'à plus de 20 notes.

Chez Beethoven, pour une distance croissante entre les notes, la corrélation décroît très graduellement, mais reste positive jusqu'à $k = 40$, étant toutefois inférieure à 0.25 au-dessus de $k = 20$.

Dans le concerto pour deux violons de Bach, la corrélation devient négative pour $k = 14$; sa valeur est déjà inférieure à 0.2 pour $k = 3$ et ne dépasse pratiquement plus cette valeur ultérieurement.

Chez Webern, la corrélation, déjà très faible pour $k = 1$, est négative pour $k = 2$ et oscille ensuite entre valeurs positives et négatives.

On peut observer une certaine similarité entre les corrélogrammes de Bach et de Webern.

La proportion de hasard pour k dans la séquence correspond à la différence entre l'unité et la valeur absolue de la corrélation : $Z_k = 1 - (r_k)$.

Le professeur Fucks a établi aussi des matrices de probabilité de passage entre deux éléments

d'une séquence, soit voisins, soit placés à une distance donnée, et considère que ces matrices donnent des informations importantes concernant les styles musicaux. On y constate qu'une petite partie seulement des passages possibles est employée. Pour la musique de Bach étudiée, le pourcentage de cases dans la matrice dont les valeurs diffèrent de zéro est de 23 % environ; pour Beethoven, le même pourcentage est de 16 %, et pour Webern, de 24 %, ce qui montre de nouveau une certaine parenté entre la musique de Bach et celle de Webern.

Séquences aléatoires

Le professeur Fucks fut amené à étudier des séquences aléatoires de musique par certaines difficultés rencontrées dans l'analyse mathématique des œuvres musicales. (Un des problèmes d'origine était la recherche de paramètres permettant de définir certains caractères de l'évolution de la musique européenne.)

Une séquence est ici considérée comme aléatoire si au moins une des qualités de ses éléments euxmêmes ou de l'ordre de ses éléments est dûe au hasard.

La première expérience fut la composition d'une pièce à quatre voix pour piano, nommée par plaisanterie « Stochastophony », exécutée et enregistrée sur bande à l'Institut de Physique d'Aix-la-Chapelle en 1952, et souvent écoutée dans les années suivantes par les visiteurs de l'Institut. Une probabilité égale était attribuée à chaque note, les séquences de notes dans le registre choisi étant déterminées par les numéros gagnants de la roulette d'un casino.

Cette distribution aléatoire p_i, dans une tessiture de n demi-tons, obéit aux relations suivantes :

$$\text{si } \sum_i p_i = 1,\ p_i = \frac{1}{n}$$

$$\text{moyenne : } \bar{i} = \sum_i i \,.\, p_i = \frac{n+1}{2} = \frac{n}{2}\left(1 + \frac{1}{n}\right)$$

La distribution p_x des fréquences d'occurrence des intervalles de x demi-tons entre deux notes consécutives, si le plus grand intervalle possible est $x = n$, donne :

$$p_x = \frac{1}{n^2}\left(n - |x|\right)$$

Avec $\sum_x p_x = 1$, on a la moyenne $\bar{x} = 0$.

Ont été calculés également les moments μ_2, μ_3 et μ_4, et l'écart-type. Il est à noter que si la tessiture est d'une octave, l'écart-type de la distribution des intervalles est de 4.9, mais cette valeur double approximativement si la tessiture est de deux octaves; ceci montre bien la nécessité de trouver des paramètres dépendant peu ou pas de la tessiture, pour pouvoir dégager des caractéristiques stylistiques indépendantes de l'étendue.

D'autres séquences musicales aléatoires ont été calculées, les paramètres pris en considération étant la hauteur, la durée et l'intensité, et les valeurs d'au moins un de ces trois paramètres devant être distribuées au hasard. Le hasard peut aussi être employé pour la distribution des intervalles de sons simultanés ou consécutifs, pour les paires d'intervalles voisins ou non voisins, ou pour des groupes d'éléments plus compliqués.

Les paramètres dont les valeurs sont fixées par décision arbitraire peuvent être des constantes, mais d'autres définitions, dépendantes ou indépendantes des paramètres aléatoires, sont possibles.

Les premières expériences de séquences aléatoires effectuées par le professeur Fucks avaient un but uniquement théorique. L'exécution des séquences obtenues s'étant avérée non dépourvue d'intérêt musical, les essais ont été continués « bien qu'aucune prétention ne soit faite pour les exemples donnés autre que l'intérêt de la possibilité d'expérience pratique de séquences de sons théoriquement intéressantes »[1].

Dans certains de ces exemples, les distributions aléatoires des éléments pour les paramètres hauteur, durée, ou les intervalles, sont faites avec une équiprobabilité d'occurrence.

Dans d'autres séquences, la probabilité d'occurrence des caractéristiques des éléments n'est pas une probabilité égale. Beaucoup de lois différentes peuvent être utilisées, celles dont se sert le professeur Fucks sont les lois de distribution de Bernoulli et de Poisson.

La distribution de Bernoulli distribue un stock d'éléments similaires parmi des cellules de n intervalles chaque. $\bar{x}$ étant le nombre moyen d'éléments par cellule, et si $p = \frac{\bar{x}}{n}$, la probabilité de trouver x éléments dans une cellule est :

$$w(x) = \binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x}$$

Si le nombre de n intervalles par cellules tend vers l'infini tandis que la moyenne x reste constante, ce cas limitatif correspond à la loi de distribution de Poisson[1]

Les séquences de sons que le professeur Fucks a composées selon les méthodes décrites sont généralement écrites pour piano ou pour quatuor à cordes.

1. Random Sequences. Gravesaner Blatter, n°s 23-24, 1962.

2. Cette loi est fréquemment employée dans la composition musicale à base de hasard (cf. travaux de I. Xenakis, chap. IV).

Hasard, musique et philosophie

Réfléchissant sur le sens de l'emploi des lois aléatoires dans la création artistique, et particulièrement dans la composition musicale, le professeur Fucks souligne le rôle immense du hasard, partiellement cause de tous les événements du monde, qui sont déterminés par l'intention, la nécessité et le hasard. Il est présent dans les phénomènes thermiques, dans l'électricité, dans le magnétisme, présent dans la vie sociale du fait qu'il intervient dans l'hérédité et dans l'environnement, facteurs fondamentaux pour la conduite d'une personne, présent dans l'histoire, ne serait-ce que parce qu'il conditionne en partie, comme on vient de le voir, la personnalité des leaders des nations. Aussi la théorie des probabilités et la statistique ont permis de développer des méthodes pour décrire qualitativement le hasard, ce phénomène omniprésent.

Dans la vie quotidienne, dans la nature, on peut trouver beaucoup d'exemples de connexion entre impressions reçues d'éléments distribués au hasard et expérience esthétique. Il suffit d'évoquer la disposition aléatoire des étoiles dans le ciel nocturne, le bruit d'une chute d'eau, les sons des consonnes dans la parole, etc...

Quelle est la signification du hasard pour les activités créatrices, scientifiques ou artistiques?

L'activité créatrice dépend de la réaction entre idée et jugement.

L'idée peut être produite intentionnellement, par exemple par l'observation systématique d'une section de la nature ou d'une collection d'événements pouvant être d'un usage artistique. Mais on peut aisément imaginer « l'usage conscient du hasard pour la production de configurations qui pourraient mener à des idées intéressantes. La production de telles configurations serait, dans le cas de problèmes quantitatifs, aidée par l'usage de l'électronique ».

Dans l'activité créatrice, l'idée doit être complétée par le jugement, qui mènera « à la définition et à l'élimination de ce qui n'est pas approprié, et à l'unification librement créative de ce qui a été trouvé approprié ». Dans le cas de problèmes aptes à être exprimés quantitativement, les règles de sélection peuvent être conçues pour des programmes d'ordinateur.

En considérant les faits exposés, et étant convaincu que l'auto-expression et l'auto-réalisation de l'homme dans l'art et dans la science sont étroitement liées à la compréhension qu'il a de lui-même et du monde, le professeur Fucks conclut que « l'emploi conscient du hasard dans l'art peut être compris comme étant absolument raisonnable, justifié, inévitable, nécessaire, même impératif ».

L'ensemble de ces travaux, en posant les premiers jalons d'une esthétique mathématique, soulève des questions intéressantes, par exemple qu'est-ce qui, dans le phénomène musical, se laisse appréhender quantitativement, et qu'est-ce qui échappe à ce genre d'approche? La démarche du professeur Fucks tente d'apporter un début de réponse à ce problème en dégageant, par les méthodes de la statistique, certaines caractéristiques quantitatives de la musique occidentale.

CHAPITRE IX

ABRAHAM MOLES ET LA THÉORIE DE L'INFORMATION

A. Moles dans son ouvrage « Théorie de l'information et perception esthétique »[1] se propose « d'essayer d'intégrer de façon cohérente les concepts essentiels issus de la science des communications, et plus précisément de la théorie de l'Information, à notre vision du monde, c'est-à-dire à notre perception, tout particulièrement dans le domaine (...) de l'Esthétique et de la Psychologie ».

A. Moles rappelle que, d'après la psychologie du comportement, l'individu est un système connecté au monde, dont l'évolution est déterminée par son environnement, par l'intermédiaire des messages qu'il en reçoit.

Depuis le développement de produits de consommation « non spécifiquement énergétiques » la communication entre les hommes est devenue une fin en soi, et non un simple rouage de l'activité de conquête du monde. Il y a deux dialectiques : matière/énergie, et action/communication; la relation entre personnes apparaît comme une fonction sociale, et non plus comme une opération nécessaire à la conquête de l'univers matériel.

La radio, le disque, le cinéma, la littérature dite d'information ont « imposé à l'attention cette autonomie de la communication intersubjective, rétablissant l'œuvre d'art à sa valeur de créatrice de sensations, donc de moteur de la société et non d'épiphénomène social ».

Les messages que l'individu reçoit de son environnement lui parviennent à travers l'espace, à travers le temps, ou les deux, par des canaux naturels (vision, etc..); dans le cas des canaux artificiels, le récepteur est un mécanisme, disque, télégraphe ou autre. « La musique est un message temporel pur (...) une modulation de la durée. »

L'information est une quantité dont la mesure est basée sur l'originalité du message; elle croît avec son imprévisibilité, et décroît en fonction de la proportion de redondance. Un message inattendu modifie le comportement du récepteur, et provoque une réaction; mais s'il est connu a priori il semble que l'information soit nulle. Mais alors pourquoi relire un livre, revoir une pièce de théâtre, réécouter une musique déjà connue?

Quelle est l'information que nous apporte le message « connu » a priori : le message culturel, et comment peut-il déterminer ses réactions s'il est déjà connu?

A. Moles fait ici une distinction essentielle entre information sémantique et information esthétique : la première, logique, traduisible, détermine des décisions et des actions, la seconde spécifique au « canal » qui la transmet, n'est pas traduisible, mais seulement transposable; elle prépare non des actions mais des états intérieurs. Tout message comporte, intimement mêlées, une certaine proportion de l'une et de l'autre. La distinction faite ici n'a d'intérêt que si elle peut être utilisée expérimentalement. Comment réaliser la discrimination entre les deux types d'information?

La marge d'arbitraire de l'originalité musicale est grande : des « degrés de liberté » existent dans l'exécution matérielle de la musique, par rapport à la partition qui convoie l'essentiel du message sémantique musical : ces degrés sont dûs à l'imprécision relative de la partition, aux variations de construction des instruments, et surtout aux différences d'interprétation. Beaucoup de ces « paramètres d'écart » sont liés à la dimension générale de niveau (dynamique).

Pour filtrer l'information sémantique, A. Moles détruit la partie esthétique du message, d'une façon relative, par la dégradation progressive des dynamiques. Cette opération, nommée écrêtage, aboutit à la limite à un niveau dynamique complètement plat, les nuances étant supprimées. Le message musical ainsi déformé reste cependant intelligible, reconnaissable, et un musicien professionnel pourrait en reconstituer la partition. Or ce qu'il en subsiste, c'est une succession de tops identiques, un découpage du temps, une sorte de rythme élémentaire, représentant l'aspect « modulation de la durée ». Il semble donc que « l'information sémantique soit étroitement liée à la modulation de la durée ».

Il est beaucoup plus difficile de détruire la partie sémantique du message afin de mettre en évidence l'information esthétique. Pour briser le découpage de la durée, A. Moles utilise le procédé d'inversion, qui lui a permis de réaliser des observations intéressantes, étant entendu que l'inversion temporelle n'est acceptée que pour des objets sonores ayant des transitoires d'attaque et de chute faibles, ce qui exclut percussions et instruments à cordes frappées ou pincées sauf dans le cas du signal musical très complexe fourni par un orchestre.

La musique classique, inversée, dans laquelle les règles considérées comme essentielles par la théorie musicale sont détruites, n'en est pas très notablement affectée, ce qui suggère que les lois de la théorie musicale sont des dogmes traditionnels et culturels d'une civilisation.

On a organisé l'écoute, par des sujets européens plus ou moins formés musicalement, de musique inversée :

a) classiques avant 1900,
b) modernes après 1915,
c) expérimentaux,
d) européens,
e) exotiques (au-delà de la frontière culturelle musulmane).

L'information esthétique perçue croît de *a*) à *b*) et à *c*), soulignant ainsi l'usage de plus en plus diversifié des timbres et la dissolution progressive des règles classiques. Le cas *c*) révèle que les musiciens recherchent, dans les musiques expérimentales, un accroissement de l'information esthétique, de « l'originalité qui apparaît comme une valeur autonome ».

Enfin l'expérience *e*) a montré que les sujets ne trouvent « aucune préférence, ni même aucune indication d'ordre, entre musique exotique directe et inversée ». Donc si la partie sémantique d'un message est fermée au sujet (lorsqu'il ne connaît pas les règles de structures propres à un milieu socio-culturel donné) il apprécie le message directement (et difficilement), en fonction de l'information esthétique.

A. Moles tire de cette étude, dont nous n'avons fait ici que résumer très brièvement certains aspects, des résultats dont nous donnons quelques extraits :

« L'ensemble du message musical se présente comme une succession de paquets d'originalité, de grandeur variable, dont l'originalité décroît plus ou moins lentement selon le nombre de répétitions et la complexité des variations introduites dans ces répétitions. (...)

« Pour que le signal musical soit « intelligible » au sens d'une perception intégrale, il convient que le débit moyen d'information, intégré sur l'extension maximum de présence soit de l'ordre du taux limite d'aperception. S'il est très inférieur à ce taux, le signal paraît dépourvu d'intérêt, s'il est très supérieur, le signal submerge l'auditeur en annihilant son attention, celui-ci ne peut alors qu'épuiser ce message par de multiples répétitions (apprentissage).

« Dans la mesure où le critère d'intelligibilité de la musique est important, comme c'est le cas dans les messages multiples (récitatif théâtral, opéra,

1. Flammarion éditeur, 26, rue Racine, Paris-6[e]. Toutes les citations faites dans ce chapitre sont extraites de cet ouvrage.

musique de film), il résulte de la structure musicale de l'information qu'une certaine alternance compensatrice doit s'exercer entre fragments d'information sémantique et esthétique.

« Ces règles de structures peuvent constituer quelques éléments pour la « composition authentique » pratiquée en musique expérimentale ou concrète, dont le problème essentiel est d'assembler des objets sonores en une séquence suffisamment ordonnée pour devenir intelligible. »

CHAPITRE X

TRAVAUX DIVERS

Nous regrettons vivement de n'avoir pas pu, faute de place, étudier en détail un certain nombre de travaux très intéressants. Il aurait fallu, pour cela, augmenter considérablement le volume de ce cahier, ce qui n'a pas été possible. Nous devons donc, en nous en excusant beaucoup, nous contenter de mentionner brièvement (avec références renvoyant à la bibliographie en fin de chapitre) les travaux suivants :

En Angleterre, trois expériences de composition musicale par ordinateur se sont développées dans les années 60. Un point commun caractérise ces travaux : l'application de règles de composition bien spécifiées et, du moins en partie, de la technique d'écriture sérielle.

D.J. Champernowne (Cambridge University) a établi un 1er programme permettant la génération et l'harmonisation de cantiques dans le style Victorien, et un deuxième programme pour la composition d'une musique basée sur la série de douze sons. De ses expériences D.J. Champernowne a tiré un quatuor à cordes, « Music from Edsac ».

Stanley Gill à l'Université de Londres, a écrit pour l'ordinateur Pegasus, un programme permettant de générer de la musique dodécaphonique « dans le style de Schoenberg ». Une particularité intéressante de cette recherche est l'emploi du « procédé de l'arbre »[1] : à tout moment de la composition, un nombre donné de versions compétitives sont stockées dans l'ordinateur; l'une d'elle est sélectionnée au hasard pour être continuée, l'extension se faisant par périodes d'une croche. Le résultat est évalué en accord avec les règles et critères fixés dans le programme; il y a alors une séquence de trop dans la machine, la plus faible est éliminée et le processus continue (Fig. 1).

Enfin D.A. Papworth a basé un programme sur une technique de permutation qui s'est développée à travers les siècles, spécialement en Angleterre d'après les sons de cloches d'églises[2]. Il s'agit de trouver toutes les permutations d'une série de sons, en accord avec certaines règles.

Un compositeur israëlien, Yehoshua Lakner, a développé une théorie généralisée de la tonalité[3] qui repose sur le postulat suivant : la musique du XVIIIe et du XIXe siècle peut être expliquée en termes d'opérations (réflexion, transpositions, etc...) effectuées sur un « motif », véritable structure générative, qui est l'accord parfait majeur, et sa « réflexion » l'accord parfait mineur. Lakner pense, que beaucoup d'autres « motifs » sont concevables et qu'une telle théorie peut permettre de trouver une base commune pour unifier les méthodes de composition contemporaine. Il se propose de tester cette théorie à l'aide d'un ordinateur.

Le studio de musique électronique de la radio suédoise à Stockholm est dirigé par un compositeur norvégien, Knut Wiggen, qui a commencé la réalisation d'une série de compositions musicales, par l'ordinateur suédois SAAB, avec un programme rédigé dans une forme d'Algol et basé sur le principe d'une continuelle prolifération des règles de composition, qui gouvernent à tour de rôle les probabilités pour les choix des paramètres musicaux; par exemple si le choix de la première hauteur est aléatoire, celles qui lui succèdent ne peuvent être sélectionnées au hasard, mais seulement en relation avec le choix déjà effectué de la première hauteur.

Aux U.S.A. James Tenney a réalisé un certain nombre de compositions par ordinateur, spécialement dans le domaine de la synthèse artificielle des sons. Il a travaillé deux ans et demi aux laboratoires de la Bell Telephone; il incorpore dans ses compositions des séquences aléatoires générées au moyen de « RAND H », un des générateurs de Music IV (cf. chapitre V). A l'intérieur de moyennes de champs et de valeurs, il autorise la génération aléatoire de séquences de durées, d'amplitudes (intensités), de fréquences (hauteurs), et autres paramètres, les moyennes pouvant changer en cours de séquence. Certaines de ses conceptions sont apparentées à celles de John Cage : Ergodos I par exemple, est formé de deux bandes de 10 minutes chaque, pouvant être jouées dans un sens ou dans l'autre, ensemble ou isolées, car leur densité moyenne de sons a été établie en conséquence; la forme a été contrôlée au début et à la fin du morceau, la section centrale étant « libre ». Ce contrôle est supprimé pour Ergodos II. On trouvera la liste des compositions de James Tenney dans la bibliographie[4].

Un autre type d'utilisation de l'ordinateur en musique comporte l'analyse et la synthèse de chants folkloriques, pratiquées en Russie, en Hongrie et en Tchécoslovaquie.

En Russie, Zaripoff utilise l'ordinateur « Oural-2 » pour la génération de mélodies de style folklorique. Il utilise un algorithme permettant d'appliquer des règles simples de composition tirées de l'analyse des œuvres; les nombres fournis par un générateur aléatoire sont triés au moyen des contraintes exprimant ces règles (forme A.B.A., fins de phrases sur I, III ou V, règles concernant les intervalles disjoints etc...). « La pensée de l'homme peut être considérée comme un système de commande original, sur le fonctionnement duquel nous ne connaissons presque rien. L'algorithme proposé, bien que ne tenant compte que d'un nombre limité de lois générales, peut servir d'essai mathématique pour l'étude du processus de composition musicale[5] ».

Goutchine, dans un article consacré à la musique électronique[6], résume quelques réflexions et expériences sur les musiques composées par ordinateur : « L'expérience séculaire a prouvé que l'auditeur s'intéresse moins à l'état émotionnel qu'à ses propres sentiments qu'il éprouve en écoutant une œuvre musicale. (...) La perception est active en elle-même, c'est un processus créateur dont le déroulement et le succès dépendent des caractéristiques de la personnalité. (...) Si cela est juste, beaucoup d'arguments contre la musique électronique tombent d'eux-mêmes. L'objection principale s'exprime dans cette formule sacramentelle : « La machine ne peut pas sentir, les émotions lui sont étrangères, donc elle ne peut pas créer, ses œuvres sont sans valeur. »

Goutchine relate l'expérience suivante : vingt spécialistes du cinéma ayant une instruction supérieure, ont été invités à écouter 16 mélodies d'un même degré de complexité, pour évaluer chacune selon un système de cinq points : 5 = excellent, 4 = bien, 3 = passable, 2 = mauvais. Huit de ces mélodies étaient composées par « Oural-2 » programmé par Zaripoff, les huit autres étant tirées de

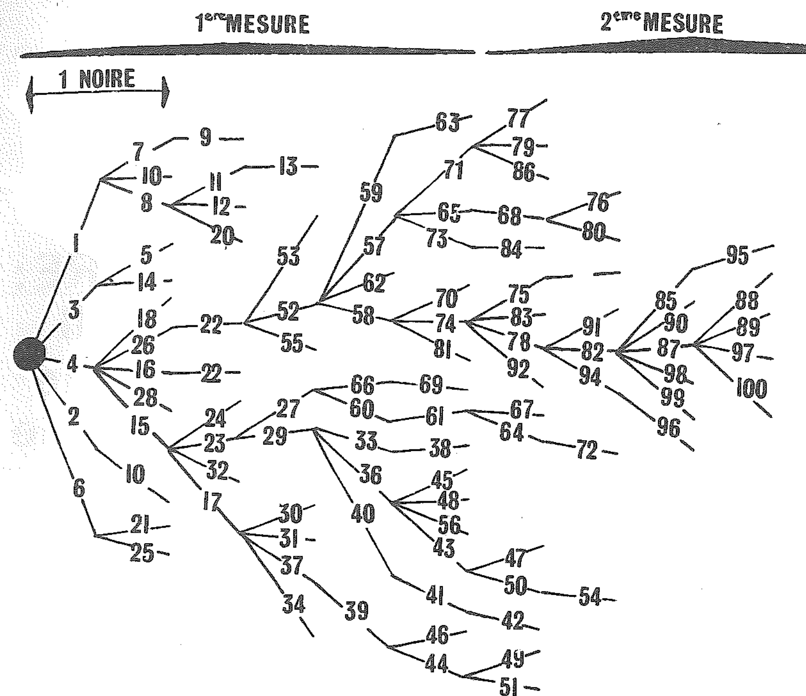


Fig. 1. — *Procédé de « l'arbre » les 100 premiers pas.*

1. A Technique for the composition of Music in a computer. By S. Gill. The computer journal. *6* : 129, 1963.

2. D.A. Papworth « Computers and Change Ringing », the Computer Journal, *3* : 47, 1960.

3. Y. Lakner, « A New Method of Representing Tonal Relations », J. Music Theory, *4* : 194, 1960.

4. Four Stochastic Studies (1962), Stochastic String Quartet, 1963, Dialogue, 1963, Radio Piece, 1963, Ergodos I, 1963, String Complement (1963), Phases, 1963, ERGODOS II, 1964, Instrumental Responses, 1964, Music for Player Piano, Fabric for Che, 1967.

5. Zaripoff. Description algorithmique des processus de la composition musicale. Ac. Sc. URSS. no 6, 132, 1960.

6. Goutchine. La musique électronique. Les Nouvelles de Moscou, 25 mai 1968.

recueils de chansons populaires dûes à des compositeurs soviétiques, la seule condition exigée étant qu'elles ne soient pas trop connues. Le résultat de l'expérience fut le suivant :

Auteur	Total des points				Moyenne
	2	3	4	5	
Homme	16	79	55	9	3,36
Machine	7	66	64	22	3,62

D'autres expériences ont donné des résultats du même ordre.

Goutchine conclut : « Le modelage des formes musicales élémentaires aboutit à des résultats qui ne diffèrent pas des résultats de l'activité créatrice humaine; dans beaucoup de cas ils leur sont supérieurs. Tout cela nous autorise à espérer que la machine pourra avec le temps aider l'homme dans son activité créatrice. »

Des expériences assez voisines de celle qui vient d'être décrite ont été faites au centre d'ordinateurs de l'Académie hongroise des sciences de Budapest par Havass et Ferentzy.

Havass a publié[7] des travaux concernant l'analyse par ordinateur d'un groupe de 100 chants folkloriques contenus dans la collection « Otfoku II » rassemblés par Zoltan Kodaly. Havass considère que l'utilité des ordinateurs est limitée à 1° l'analyse des corrélations entre la musique réelle et la musique artificielle; 2° l'investigation statistique des chants folkloriques; 3° les corrélations de la musique et des différences linguistiques; 4° l'analyse de la théorie musicale.

Ferentzy, qui a effectué des recherches concernant l'analyse des mouvements de danse et de la notation chorégraphique[8], a fait une observation intéressante : le résultat de son étude des pas de danse folklorique semble correspondre, au moins en terme d'analyse mathématique, à certaines des opérations communément employées dans la composition sérielle. Il a, également par ordinateur et au moyen d'un programme FORTRAN IV, réalisé une méthode d'analyse de Markov pour l'étude des styles musicaux[9].

En Tchécoslovaquie, Fencl a également réalisé un algorithme pour la synthèse des mélodies populaires.

CHAPITRE XI

NICOLE LACHARTRE : ESSAI I ET ESSAI II

deux expériences de composition musicale automatique

Base esthétique

L'idée de base que nous avons adoptée au départ de ces premières expériences de composition musicale automatique est de partir non de structures abstraites, mathématiques ou autres, appliquées à la totalité des possibles musicaux pour y effectuer une sélection, mais directement d'un donné musical composé traditionnellement, dont toutes les possibilités de combinaisons sont exploitées automatiquement, afin d'en réaliser une investigation systématique.

Pourquoi une telle démarche? Nous avons pensé qu'un compositeur de musique est un individu qui présente la particularité de s'exprimer au moyen de structures de sons. Cela suppose chez notre compositeur : 1° une nécessité de s'exprimer. Le compositeur est habité par un univers intérieur de sons (nous nous demandons nous-même si cet univers est conscient ou inconscient), dont il contrôle et organise l'expression sous forme d'œuvres dites musicales, afin que d'autres, en écoutant ces œuvres, puissent pénétrer dans le monde sonore original propre à un individu;

2° cela suppose un engagement dans l'activité créatrice de l'intelligence, de la sensibilité, de l'intuition, de l'inconscient, etc..., le tout à un dosage inégal selon les individus, et l'idéal, rarement atteint, étant un engagement de la totalité de la personnalité.

Si l'on admet ces définitions, il apparaît intéressant, nécessaire, indispensable peut-être, de tenter de mettre les possibilités d'automation offertes à la composition musicale par les ordinateurs directement au service de cette expression sous forme de sons essentielle au compositeur. C'est là la raison d'être principale de notre expérience.

7. F. Kiefer (ed), Computational Linguistics, VOL. III, Computing Centre of the Hungarian Academy of Sciences, Budapest, 1964.
a) M. Havass, « A Simulation of Music Composition. Synthetically composed Folkmusic, » pp. 107-108.
b) E.N. Ferentzy and M. Havass, « Human Movement Analysis by Computer: Electronic Choregraphy and Music Composition », pp. 129-188.
8. E.N. Ferentzy, « Progress Report on the Project, Analysis of Musical Styles by an Electronic Computer, sponsored by Washington State University, unpublished report, Washington State University Pullman, 1966.
9. E.N. Ferentzy, « On formal Music Analysis-Synthesis: its Application in Music Education, » Computational Linguistics, *4* : 107, 1965.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
FA 4	DO 4	SI 3	MIb 4	SIb 3	LA 3	FA# 3	SOL 4	REb 4	DO 4	MIb 4	MI♮ 4	SOL# 3	RE 4	MIb 4	LA 4	FA 4	LAb 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
P	P	P	P	P	P	f	f	f	f	f	f	P	mf	f	ff	ff	ff	f	f	mf

Cellules de la partie de chant. Hauteurs 1 = 18 Rythmes 1 = 12
Intensités 1 = 21. RES 1 = 252

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
SI 3	RE 4	LAb 4	SOL 4	FA# 4	FA♮ 4	LA♮ 4	RE 4	DO# 4	SOL 3	FA# 3	RE 4	MIb 4	SOL 4	FA♮ 4	RE 4	RE 4	RE 4	FA# 3	SOL 3	DO 3	SI 3	MIb 3	SOL 3	RE 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
PP	PP	PP	PP	PP	PP	PP	PP	PP	PP	PP	PP	PP	PP	PP	sff	P	P	f	f

Cellules de la partie de hautbois. Hauteurs 2 = 25. Rythmes 2 = 30
Intensités 2 = 20. RES = 300

Fig. 1. — *Cellules des parties de chant et de hautbois pour Essai I.*

Base technique

Comment réaliser ce projet? Le nombre d'instruments ayant été librement fixé à quatre, afin de ne pas compliquer à l'excès le problème, nous avons adopté la méthode suivante : pour chaque instrument, il a été établi une cellule de hauteurs, une cellule de rythmes et une cellule d'intensités, ces trois cellules étant de longueurs inégales, c'est-à-dire qu'elles comportent un nombre différent d'éléments. Elles représentent, dans le processus de composition, la part de « libre expression sous forme de sons » du compositeur (Fig. 1).

La première expérience a donné lieu à la composition d'une partition pour hautbois, clarinette, Onde Martenot et voix de femme. Les cellules de hauteurs sont donc monodiques, et n'excluent pas les répétitions de notes. L'investigation automatique des possibilités de combinaisons est ensuite réalisée automatiquement : les trois cellules démarrent simultanément, et leurs éléments exprimés par des numéros, se déroulent dans l'ordre fixé, autant de fois qu'il est nécessaire pour retomber simultanément sur les trois premiers. Il en résulte, dans un premier stade, une liste de toutes les permutations possibles entre éléments (Fig 2). Dans un second stade, cette liste est utilisée pour exposer dans la partition toutes les combinaisons possibles entre éléments de hauteur, de rythme et d'intensité.

Le travail étant effectué pour chacune des quatre parties, leur déroulement simultané dans la partition entraîne automatiquement une nouvelle série de permutations, portant cette fois-ci sur les quatre voix entre elles. Le nombre total de permutations différentes entre les voix étant trop élevé pour être entièrement utilisable dans cette expérience, 1008 d'entre elles seulement ont été employées.

Ce système est comparable à un mouvement d'horlogerie calculant sans cesse et conjointement un certain nombre de cellules de longueur inégale, jusqu'au moment où les longueurs sérielles coïncident de nouveau.

Lorsque nous avons obtenu la liste de toutes les permutations possibles, nous avons dû choisir entre deux attitudes différentes : ou bien effectuer un choix de celles qui nous paraissaient les plus intéressantes; ou bien les utiliser toutes, dans la

Haut. 1 : 1 à 18

Ryt. : 1 à 12

INT. : 1 à 21

13	01	13		I	
14	02	14	01	01	01
15	03	15	02	02	02
16	04	16	03	03	03
17	05	17	04	04	04
18	06	18	05	05	05
01	07	19	06	06	06
02	08	20	07	07	07
03	09	21	08	08	08
04	10	01	09	09	09
05	11	02	10	10	10
06	12	03	11	11	11
07	01	04	12	12	12

Fig. 2. — *Fragment de la liste des permutations pour la partie de chant d'Essai I.*

succession exacte fournie par l'automatisme mis en place. Pour les deux premiers essais ici exposés, nous avons opté pour la seconde solution, ce qui équivaut à accepter, une fois les cellules de base construites, un déterminisme intégral dans le déroulement de la composition. Nous avons fait ce choix dans le désir de tenter l'expérience d'un maximum d'identité dans un maximum de diversité, ce qui nécessitait à la fois de respecter le déroulement immuable des cellules et d'utiliser toutes les variantes offertes par les permutations.

Une objection vient ici naturellement à l'esprit; il est évidemment impossible de prévoir entièrement à l'avance toutes les rencontres sonores occasionnées par les permutations; il peut arriver que certaines de ces rencontres soient moins heureuses que d'autres, et la méthode employée nous interdit de les écarter. C'est dans les cellules de base que doit être concentré un potentiel suffisant de possibilités contrapunctiques et d'intérêt mélodique pour nourrir ensuite le déroulement de la composition, ce qui représente la nécessité d'un travail approfondi et minutieux de mise en place préalable.

Essai I, Essai II

Pour réaliser Essai I, les éléments des cellules étant numérotés de 1 à n, nous avons établi les listes de permutations pour chaque instrument à la main, en suivant mécaniquement le déroulement simultané des cellules. Toutefois la longueur des calculs nécessaires (6 heures et demie d'un travail fastidieux), a fait apparaître l'opportunité de l'emploi d'un ordinateur. Nous reproduisons ici un fragment de la partition (Fig. 3), sur lequel il est aisé de saisir le déroulement, pour chaque instrument, des cellules de hauteurs, qui reviennent avec des rythmes et des intensités différents, du fait des permutations d'éléments entre cellules.

Afin d'évaluer précisément les facilités offertes par l'ordinateur, nous avons conservé exactement, pour la deuxième expérience, les mêmes longueurs de cellules que lors du premier essai. Les instruments choisis, pour Essai II — clavecin, harpe, guitare et zarb — ont nécessité quelques changements dans la conception des cellules de base : les trois premiers de ces instruments, étant polyphoniques, ont permis l'introduction d'éléments polyphoniques dans les cellules de hauteurs. Le zarb étant de hauteur indéterminée, ce paramètre a été remplacé par celui de « classe de timbre », qui utilise les attaques différentes réalisables avec cet instrument. Le clavecin ne permettant pas l'obtention de dynamiques différentes par des changements de toucher, mais par l'emploi de jeux différents (4 pieds, 8 pieds et 16 pieds, luth), la cellule d'intensité a été remplacée par une cellule « classe de timbre » concernant l'emploi des jeux (Fig. 4).

Pour réaliser Essai II, le mécanisme du déroulement simultané des cellules inégales, entraînant la liste complète des permutations de leurs éléments, a été programmé en Algol, et les résultats ont été calculés par un ordinateur B-GE, grâce à l'obligeance de la direction de la Compagnie Bull-General Electric, et à l'extrême bienveillance de Pierre Barbaud. Les mêmes calculs, qui avaient nécessité six heures et demie de travail à la main, ont été réalisés en une minute par la machine, ce qui illustre avec éloquence l'avantage de cette dernière technique. Dans le programme, chaque cellule est représentée par un tableau à une dimension, garni des nombres représentant les éléments lors de la première procédure. Le déroulement parallèle des cellules de hauteur, de rythme et d'intensité, avec les permutations qu'il provoque, est calculé pour chaque instrument par la procédure RESULT, et une troisième procédure met en parallèle les quatre voix.

Comme pour « Essai I », les 1008 permutations calculées ont toutes été employées dans la partition d'Essai II, la seule différence étant que les quatre instruments entrent, et à la fin se taisent, successivement.

◆

Le procédé employé pour ces expériences est susceptible de variantes et de perfectionnements, entre autres l'imposition de contraintes équivalant à certaines règles de composition choisies par le compositeur, et permettant d'éliminer automatiquement les rencontres non conformes à ces règles. Il est aussi très concevable, comme nous l'avons déjà signalé, que le compositeur, en possession d'une liste complète des permutations possibles, effectue lui-même le choix de celles qui lui paraissent les plus intéressantes et les ordonnent à son gré dans la partition. Ceci resterait dans la ligne que nous avons adoptée, celle d'une exploration systématique et complète de toutes les possibilités de combinaisons d'un certain nombre de cellules musicales, correspondant à des paramètres donnés.

Cette démarche, qui met l'accent plus sur l'écri-

Fig. 3. — *Fragment de la partition d'Essai I.*



Partie de clavecin. Hauteurs = 42. Rythmes = 36 Classe de timbre = 16
RES = 540

Fig. 4. — *Cellules de base de la partie de clavecin pour Essai II.*

ture musicale horizontale que sur l'écriture verticale, peut se situer dans le cours de l'évolution de l'écriture contrapunctique. Issue des techniques de contrepoint du passé, elle en est cependant foncièrement différente. Il est à remarquer d'ailleurs que l'écriture musicale contrapunctique est différente selon les époques, cette évolution étant la conséquence : 1° de changements dans les états psychologiques et dans les conceptions musicales; 2° d'innovations techniques dans la facture des instruments (moyens de produire le son), et maintenant dans les moyens de composition (ordinateur). La musique dodécaphonique et sérielle, par exemple, est le résultat d'une évolution dans la conception. Vu sous l'angle d'une exploration systématique des combinaisons de cellules musicales, et du nécessaire passage par l'ascèse d'un déterminisme total, notre démarche présente une parenté avec la conception sérielle de la musique.

Au XXe siècle, les musiciens disposent de possibilités techniques immenses, d'un éventail élargi de moyens dont la richesse et la puissance amènent inexorablement le compositeur à se poser une question fondamentale : « Quel usage faisons-nous de la technique? Parvenons-nous à dominer la puissance qu'elle nous donne, afin qu'elle ne nous détruise pas, mais au contraire nous aide à nous exprimer? »

Chaque recherche individuelle présente un aspect différent de la finalité de la musique. Mais qu'est-ce que la musique? A cette question, il n'y a pas une seule réponse, il y en a de nombreuses!

CHAPITRE XII

INTERROGATIONS

Nous avions l'intention de terminer cette série d'études par une conclusion; nous n'avons pu aboutir qu'à une suite d'interrogations.

Ont été examinés jusqu'à présent les aspects divers que revêt, dans le domaine de la musique, l'emploi des ordinateurs. Il existe donc actuellement trois directions de recherches : le calcul de partitions basées sur des lois mathématiques ou autres, la synthèse artificielle du son, et l'analyse

> la musique est une mathématique de l'âme qui compte sans savoir qu'elle compte.
>
> LEIBNIZ.

mathématique de la musique avec son complément, la simulation des processus de composition.

Il est bon maintenant de s'interroger sur le sens et la portée de certaines des démarches décrites, et sur les questions qu'elles provoquent; nous découvrirons, chemin faisant, la diversité et l'intérêt des problèmes soulevés.

Iannis Xenakis cherche des « structures abstraites » gouvernant et déterminant le faire d'une œuvre, base son esthétique sur l'emploi des mathé-

> platon cherche quelles sont les sciences propres à former ceux qui veulent sortir de la caverne. Ce sont l'arithmétique, la géométrie, l'astronomie, la musique.
>
> Simone WEIL.

matiques, et spécialement des lois du hasard, confie la réalisation de toute une famille d'œuvres à un ordinateur, bref semble s'orienter vers une conception abstraite, raisonnée, scientifique, de la musique, en soumettant ses structures aux lois universelles de la logique et des mathématiques. Mais le même compositeur, pour toute une partie de ses travaux, puise une inspiration vivace, concrète, dans l'universalité humaine des grands thèmes de la tragédie grecque. Mais le même compositeur, qui a su

> tout art de premier orde est par essence religieux. Une mélodie grégorienne témoigne autant que la mort d'un martyr.
>
> Simone WEIL.

redécouvrir que toute musique est religieuse dans la mesure où elle sort celui qui l'écoute des limites étroites de son moi pour le mettre en contact avec une forme quelconque de totalité, utilise pour sa dernière œuvre, Nuits, les matériaux de la musique sacrée balinaise (Ketjak : la danse des singes), et tente, avec Bohor, d'entraîner ses auditeurs jusqu'à

> musique grégorienne. Quand on chante les mêmes choses des heures chaque jour et tous les jours, ce qui est même un peu au-dessus de la suprême excellence devient insupportable et s'élimine.
>
> Simone WEIL.

l'extase au moyen des répétitions et de l'intensité sonore poussées jusqu'aux limites extrêmes du supportable. N'y a-t-il pas là un paradoxe, une contradiction au moins apparente entre deux démarches menées par le même homme, et qui semblent étrangères? L'abstraction des structures mathématiques ne lui a-t-elle pas suffi, a-t-elle même provoqué en lui une réaction, un désir conscient ou inconscient d'une expression basée sur des fondements touchant plus directement la sensibilité humaine : le religieux, le sacré, le tragique, la violence, dans lesquels se cristallisent des tendances

> le rythme, le son, sont des éléments corporels.
>
> Simone WEIL.

inhérentes au plus profond de l'âme humaine, des tensions fondamentales présentes à travers les siècles et les civilisations, des questions criées et restées sans réponses, depuis l'éveil progressif du conscient humain, bref tout ce qui, dans la partie la plus inaccessible de notre inconscient, perpétue les marques indélébiles d'une longue continuité héréditaire?

Il existe, au début de l'œuvre de Xenakis, un moment privilégié de synthèse entre l'expression musicale d'une sensibilité et celle, au moyen des lois mathématiques, d'une intelligence, dans Metastasis et Pithoprakta par exemple. Mais il semble que par la suite il y ait eu une scission entre ces deux aspects; certaines familles d'œuvres (celles basées sur les lois du hasard et calculées par ordinateur en particulier), n'effleurent plus le domaine de la sensibilité, et demeurent sur le plan de la construction intelligente. D'autres (l'Orestie, Polla ta Dinha, Bohor, Nuits), plongent des racines profondes dans la sensibilité, et même dans l'inconscient, les structures mathématiques y sont peu visibles ou absentes. La synthèse, miraculeuse peut-être, qui fut atteinte, ne se fait plus.

Le problème que pose Xenakis-compositeur, Xenakis-homme, nous concerne et nous touche profondément : c'est celui de la liaison possible entre une expression scientifique et une expression intuitive, entre l'intelligence et la sensibilité, entre les moyens techniques fournis par le progrès et les moyens du psychisme humain, avec ses limites, avec la richesse et le danger de son inconscient. Dans la société occidentale actuelle, dominée par les progrès techniques et scientifiques, le psychisme individuel et collectif ne peut pas suivre l'évolution, ce qui provoque un déséquilibre tragique. La synthèse n'est pas faite; c'est peut-être pourquoi l'œuvre de Xenakis, qui est une parfaite illustration de ce problème essentiel, nous paraît si importante et si proche.

Chacune des démarches visant à déduire une structure musicale de lois mathématiques, à mettre au point des méthodes de composition automatiques, à analyser la musique déjà écrite en partant de données scientifiques, à synthétiser artificiellement les sons, va poser des questions, éclairer des aspects différents du problème évoqué.

Pierre Barbaud subordonne entièrement la création musicale à l'intelligence, qui est pour lui la

plus noble des facultés humaines; il détermine des lois générales qui, signifiées à l'ordinateur sous forme de programmes, gouverneront la composi-

> les machines ont moins besoin des hommes que les hommes des machines. L'homme se trouve maintenant subordonné à la machine.
>
> Simone WEIL.

tion automatique. Le choix, à l'échelon humain, ne s'exerce que sur les types de structures à sélectionner. Dans ce cadre général, le choix des décisions du détail de la composition est soumis aux lois du hasard, ou à des tables de probabilités tirées de sources variées. La musique de Pierre Barbaud est une construction subtile de l'intelligence, un jeu dont la fantaisie et la variété sont fonctions de

> le beau donne tout de suite l'infini.
>
> Simone WEIL.

la richesse des possibilités de combinaisons différentes, de choix, que l'organisation pré-établie par le compositeur permet à la machine. Mais c'est un jeu gratuit : le compositeur refuse, comme n'ayant pas sa place dans une activité lucide et ordonnée, toute participation de la sensibilité, de l'inconscient.

> l'artiste fait silence en lui-même, et les puissances de l'âme accourent, mais l'artiste écarte l'inspiration elle-même; c'est dans cet instant de suspens qu'il crée, et cet instant ne dure jamais assez... ce qui fait l'inspiration c'est la puissance de la régler, de la dominer.
>
> Simone WEIL.

Cette attitude, constante dans l'œuvre de Pierre Barbaud, éclaire un aspect différent du problème examiné précédemment. Ici, il n'y a pas de tentative de synthèse entre intelligence et sensibilité, mais bien au contraire, un postulat de base : ce sont deux domaines séparés, qui n'ont pas à s'interpénétrer. La composition musicale est placée dans le domaine de l'intelligence, la science et la technique sont mises à son service. Mais on peut se demander si les choses sont aussi claires et simples, et si la personnalité humaine peut se laisser découper en secteurs entièrement séparés. La composition musicale, comme tout acte de création dans quelque domaine que ce soit, n'est-elle pas une activité qui engage la personne humaine dans sa totalité,

> il faut que l'unité d'une œuvre d'art soit sans cesse en péril et sauvée à chaque instant.
>
> Simone WEIL.

intelligence ET sensibilité, conscient ET inconscient? Refuser de faire place, dans cette activité, à une partie de soi-même, quelle qu'elle soit, n'est-ce pas une sorte de mutilation? Il ne semble pas y avoir de réponse absolue à ces questions, car tout est fonction de la géographie interne du psychisme de l'individu : une telle attitude, malgré son extrémisme apparent, peut être valable si l'intelligence est la fonction absolument dominante d'une personnalité, mais elle n'est en aucun cas généralisable et applicable à tous. Il n'est pas possible, dans le domaine de la création artistique, de concevoir des règles précisant que l'intelligence, ou la sensibilité, ou l'inconscient, ou l'intuition, ou autres,

> il faut qu'on ait l'impression que c'est la passion qui transforme le thème et qui va le faire sombrer.
>
> Simone WEIL.

doive dominer. Il revient à chaque créateur, individuellement, de se connaître, de se situer, et de se réaliser.

Il est à noter que Iannis Xenakis et Pierre Barbaud ont l'un et l'autre utilisé les lois aléatoires pour gouverner les choix à effectuer parmi les possibles musicaux. Que peut signifier l'importance accordée au hasard dans les compositions calculées par ordinateur? Cet emploi du hasard semble pouvoir être considéré comme une sorte d'engagement dans la négation, dans la négation de toute une forme de culture où les choix étaient basés sur des lois, en perpétuelle évolution certes, grâce à la remise en cause faite par chaque véritable créateur, mais tout de même assez généralement admises, et également confiés au libre arbitre du compositeur, ce qui impliquait l'influence de tout ce qui contribue à former une personnalité, environnement, conditionnement social et culturel, etc...

Ainsi cet aspect de la composition par ordinateur va soulever deux problèmes d'une actualité particulièrement brûlante dans le domaine de la création artistique en général, et de la composition musicale en particulier :

1° c'est le seul point sur lequel la musique par ordinateur représente peut-être une coupure totale avec ce qui s'était fait jusqu'à son apparition. On peut se demander alors si une telle coupure est souhaitable, et si une mutation directement issue du passé dans le cours d'une évolution n'est pas plus riche en devenir qu'une rupture totale. Le hasard, tel que l'emploient les compositeurs sériels, n'est pas de même nature : il s'agit alors plutôt d'un choix entre des possibilités que le compositeur a généralement fixées à l'avance avec assez de précision, ou dont il a tout au moins orienté l'organisation. C'est alors une notion nouvelle, mais non destructrice de l'héritage musical du passé;

2° si l'on admet que baser des choix sur le hasard dans la composition musicale équivaut à un engagement dans la négation d'une forme de culture, une question se pose : l'art peut-il exister en lui-

même, un engagement quel qu'il soit lui est-il conciliable, souhaitable ou indispensable? Cette question s'est posée depuis longtemps aux artistes, et ils y ont, individuellement, apporté des réponses différentes. Finalement, il semble que tout art soit engagé, mais on peut discerner deux sortes d'engagements : un engagement d'origine extérieure, si l'activité créatrice individuelle s'exerce en fonction d'une adhésion ou d'une opposition à une collectivité quelconque, religieuse ou politique; et un engagement purement intérieur, s'il ne se fait pas par rapport à des éléments extérieurs à l'individu, mais uniquement en fonction de l'évolution interne du psychisme de l'artiste, et selon les lois personnelles dictées par une rigoureuse exigence intérieure. Il n'y aurait donc pas, en définitive, d'art non engagé, car en y regardant de près, « l'art pour l'art », c'est aussi une forme d'engagement, dans la gratuité, un engagement du premier type décrit s'il s'effectue par opposition à une société, et du second type s'il est la conséquence d'une exigence purement intérieure à l'individu.

On peut juger, par l'importance vitale de ces questions qui n'ont été qu'effleurées, des répercussions profondes dans l'évolution musicale de l'emploi du hasard dans la musique par ordinateur, en tant que phénomène actif, catalyseur d'une certaine attitude mentale.

Mais continuons notre tour d'horizon, et examinons maintenant les travaux effectués à la Bell Telephone of New Jersey, où les moyens techniques

> l'ouïe : le son ne se trouve pas dans la cause du son. Le son n'est en aucun lieu, pas plus que la couleur, et il n'est qu'un objet du sens de l'ouïe. Notre oreille ne peut pas nous dire d'où vient le son, car elle ne sait même pas si le son a une cause.
>
> Simone WEIL.

les plus perfectionnés, les plus ingénieux, les plus coûteux, sont mis au service de la recherche dans le domaine de la synthèse des sons. De telles possibilités techniques comptent parmi les résultats les plus remarquables et les plus spectaculaires du progrès scientifique. Des travaux menés depuis plusieurs années ont abouti à la mise au point d'un programme pour la synthèse des sons qui est une grande réussite technique, et qui permet d'étudier en détail la composition des sons et d'en dégager les paramètres significatifs pour l'oreille, ce qui est très important pour améliorer les possibilités de synthèse dans l'avenir.

Mais lorsqu'on passe du stade de l'étude du son isolé à celui de l'étude et du travail de séquences de sons, les exemples musicaux donnés dans les comptes rendus de ces travaux, mis à part un essai de composition, Swansong, surprennent par leur absence totale d'intérêt musical — voir leur absurdité : passage progressif de « la marche des Grenadiers » à « Johnny s'en revient chez lui » — version japonaise et pentatonique d'une berceuse de Schubert par changement progressif de l'échelle.

Ces expériences, sans doute nécessaires pour mettre au point une technique, n'en révèlent pas moins une tournure d'esprit inquiétante sur le plan musical. Elles ne constituent en aucune manière un résultat musicalement valable, précisent leurs auteurs. Pourquoi alors les faire sous cette forme, et pourquoi les montrer? Il était certainement réalisable de limiter les résultats publiés à des essais de composition, même très simples, employant les techniques impliquées. L'impression qui résulte de ces illustrations sonores inattendues est qu'une prouesse technique et des recherches passionnantes aboutissent à un résultat musical navrant (mis à part la séquence mentionnée d'œuvre expérimentale). S'agit-il des premiers balbutiements d'une musique naissante? Ou cette carence traduit-elle le manque d'une pensée qui gouverne la technique — de tout un fond de connaissances humaines et musicales qui s'exprime au moyen, par le truchement de la technique?

Il n'est peut-être pas inutile de rappeler, bien que cela paraisse un lieu commun, que la technique n'est pas une fin en soi, mais seulement un moyen.

Cela soulève un autre problème, celui des musiciens qui n'ont pas la connaissance de toutes les techniques actuelles, et des techniciens dont la formation musicale peut n'être pas suffisante.

Un compositeur qui veut pouvoir utiliser les moyens que la science met à sa disposition à notre époque doit avoir, en plus bien entendu d'une connaissance suffisante des musiques du passé et des techniques d'écriture musicale classique et contemporaine, un minimum de connaissances de mathématiques et de programmation pour les musiques calculées à l'ordinateur; il doit aussi avoir des notions de manipulation des appareils électroniques pour la musique électro-acoustique. Cela suppose une somme de connaissances très étendue qui fait de la musique un lieu de rencontre de disciplines différentes. Naturellement un compositeur peut être spécialisé dans un domaine particulier : ordinateur, musique électro-acoustique, musique sérielle ou autre. Mais s'il ne connaît que son propre domaine, il se prive d'une possibilité importante : celle de faire l'expérience de modes d'expression différents, expérience toujours très enrichissante, afin de choisir en connaissance de cause celui ou ceux qui lui conviennent le mieux. Il y a d'ailleurs souvent inter-influence entre les différents domaines, comme le savent très bien par exemple les musiciens qui ont pratiqué la composition avec la technique électro-acoustique et la composition instrumentale.

Il reste à examiner l'application des mathématiques, de la théorie de l'Information et de la statistique à l'analyse musicale (travaux de Fucks), à la

perception esthétique (travaux de Moles), celle des méthodes de la cybernétique à l'étude des mécanismes de la création artistique (Philippot), et celle de la logique à une expression formalisée du langage musical (travaux de Barbaud et de Xenakis). Ces démarches ont en commun le fait qu'elles ne portent pas sur l'acte de composition lui-même, mais sur les mécanismes de cet acte, sur l'analyse des œuvres déjà existantes et sur la perception de la musique.

L'esthétique mathématique peut - elle rendre compte, même partiellement, de l'évolution du langage musical, et permettre de dégager des lois de la création musicale? En dehors de la complexité de réalisation de ces recherches, il faut réfléchir sur leurs principes mêmes : les lois de la création artistique sont-elles mesurables par les mathématiques? Dans quelle mesure sont-elles analysables au moyen de procédés algorithmiques? Qu'est-ce qui peut se laisser saisir par cette méthode de recherche, et qu'est-ce qui reste en dehors du champ? Peut-on parvenir à une formalisation effective du langage musical?

Dans ce domaine, il existe un moyen de contrôle très précieux, c'est celui de la simulation des processus de composition, que ce soit par ordinateur, comme le pratique Pierre Barbaud, ou avec une « machine imaginaire », ainsi que le fait Michel Philippot. Ce procédé permet un contrôle, par les résultats obtenus, de la justesse des règles ou de la formalisation établies. Dans le cas, par exemple, de la simulation de l'harmonie classique effectuée par Pierre Barbaud, les résultats se sont avérés positifs, prouvant ainsi le bien-fondé de la formalisation établie.

Il serait bien entendu intéressant de situer l'intérêt de ces recherches, et leurs limites, mais l'auteur, qui ne les a pas pratiquées personnellement, ne se sent pas la compétence nécessaire pour le faire, et se contentera de rappeler que la musique est chose complexe, union du sensible et de l'intelligible. Forme et contenu, rythme et mélodie, structure et événement, sont constituants de la musique.

Nous avons vu l'ordinateur, « amplificateur d'intelligence », être l'outil de travail docile et rapide pour édifier des constructions musicales basées sur la combinatoire, sur les lois du hasard, sur la logique, bref sur des expressions universelles de l'intelligence humaine. Mais les lois mathématiques n'ont pas, jusqu'à présent, exprimé la personnalité humaine dans sa totalité; l'ordinateur peut-il être un outil de travail au service d'une activité de création artistique faisant appel à cette totalité? Cette question ne semble pas jusqu'à

> double mouvement descendant : refaire par amour ce que fait la pesanteur. Le double mouvement descendant n'est-il pas la clef de tout l'art. Le mouvement descendant, miroir de la grâce, est l'essence de toute musique. Le reste sert seulement à l'enchâsser.
> Simone WEIL.

présent avoir été posée. C'est pour tenter d'y apporter réponse que nous avons entrepris l'expérience de programmation décrite dans le chapitre XI. En calculant, au moyen d'un système extrêmement simple, toutes les combinaisons possibles de cellules musicales établies librement et subjectivement par le compositeur lui-même, la machine va-t-elle fournir des résultats où se trouveront réunis le travail de l'intelligence et celui de la sensibilité? L'ordinateur sera-t-il un « amplificateur de la personnalité? » Cette première expérience, encore rudimentaire, mais susceptible de beaucoup de perfectionnements et de développements, ne permet pas de répondre dès maintenant à ces questions. Son but, plus modeste, est simplement de les poser clairement et d'étudier les voies qu'elles ouvrent.

Ainsi chaque démarche individuelle pour utiliser les lois mathématiques et le calcul, à la main ou par ordinateur, dans la composition ou dans l'ana-

> tout art est collectif.
> Simone WEIL.

lyse musicale, examinée avec l'intérêt et le respect que mérite toute recherche honnête et approfondie, chaque démarche soulève des questions fondamentales, voile ou révèle des problèmes essentiels touchant au musicien du XXe siècle face à la civilisation technique; ces problèmes finalement rejoignent ceux de l'homme moderne avec ses contradictions, ses lacunes et ses angoisses; là peut-être se révèle une

> l'art ne pourra renaître que du sein de la grande anarchie.
> Simone WEIL.

fonction sociale (étant entendu que le terme « fonction sociale » recouvre deux sens différents : rôle matériel et rôle spirituel dans la société, seul le second aspect étant ici examiné), de l'artiste, la plus importante aujourd'hui, peut-être la seule : dans ses recherches, dans son œuvre, dans sa démarche, l'artiste, quel que soit son mode d'expression, musique, peinture, sculpture ou autre, cristallise les problèmes inconscients des hommes de son époque, les révèle en les exprimant, et finalement les amène au niveau de la conscience, non de la masse du public, mais de quelques-uns. Cette prise de conscience des véritables problèmes ne peut actuellement être que le fait d'un petit nombre de gens qui disposent du temps, de la volonté, de la lucidité, et qui fournissent les efforts nécessaires pour réfléchir, penser et méditer. Dans un monde en mutation, en proie à la peur et au déséquilibre entre un progrès scientifique transcendant et une évolution psychique stagnante, les petits lumignons tenaces de ces lucidités individuelles sont peut-être

> la grandeur de nos jours... ne peut d'ailleurs être que solitaire, obscure et sans écho... (or pas d'art sans écho).
> Simone WEIL.

le seul recours face au déferlement absurde des excès de tous ordres.

CHAPITRE XIII

CARREFOUR D'IDÉES

Le texte ci-après a été adressé à un certain nombre de personnalités appartenant à des disciplines différentes :

L'automation est un des phénomènes les plus caractéristiques de l'époque actuelle. L'utilisation des ordinateurs se généralise dans les pays industrialisés, provoquant des modifications profondes dans les techniques et dans les conditions de travail; l'avenir est proche où l'automation aura des répercussions capitales sur le mode de vie d'une partie de l'humanité. Entraînera-t-elle la naissance d'un nouvel humanisme scientifique?

Des essais ont été faits, spécialement dans le domaine de la musique, pour mettre les ordinateurs au service d'une activité de « création artistique » (étant entendu que le terme « artistique » ne peut plus être pris dans le même sens qu'autrefois, l'art ayant quitté depuis longtemps le domaine du sacré où il trouva son sens et sa fonction pendant des millénaires, et l'audience des artistes contemporains consistant souvent en un petit nombre d'initiés).

La revue « Diagrammes du Monde », qui traite de toutes les techniques contemporaines, va publier dans le premier semestre de 1969 un numéro consacré à l'emploi des ordinateurs dans la musique. La direction de cette revue a confié à Nicole Lachartre la tâche de résumer les expériences faites dans le domaine de la composition par ordinateur en France et dans les pays étrangers.

Cette technique nouvelle entraîne-t-elle une modification de la conception de la composition musicale? Nicole Lachartre a pensé qu'il serait très intéressant de rapprocher et de comparer, dans un carrefour d'idées, les points de vue d'un certain nombre de personnalités marquantes.

Si vous avez l'obligeance de bien vouloir participer à notre carrefour d'idées, voici les questions proposées :

1° Qu'est-ce que la musique représente pour vous, un langage, un mode d'expression, une discipline artistique, une discipline scientifique, ou autres?

2° Vous sentez-vous concerné, intéressé, touché, indifférent, ou heurté par la musique contemporaine, et pourquoi?

3° Pensez-vous que la musique possède encore actuellement, et conservera dans l'avenir, une fonction sociale?

4° A votre avis, la création artistique en général, et la composition musicale en particulier, font-elles appel principalement à la sensibilité, à l'intelligence, aux deux réunies, à l'intuition, à l'inconscient, ou autres?

5° Réagissez-vous par l'approbation ou par l'hostilité à l'emploi des ordinateurs dans la composition musicale, et croyez-vous que cette expérience, encore à ses débuts, peut dans l'avenir amener un enrichissement, une révolution peut-être, ou un appauvrissement dans le langage musical?

Nous sommes très heureux de publier ci-dessous les réponses de cinq compositeurs, MM. Henry Barraud, François Bernard Mâche, Maurice Ohana, Luis de Pablo et Antoine Tisné, un critique musical et écrivain, M. Antoine Goléa, un pianiste, M. Claude Helffer, un professeur de musique, Mlle Danielle Sevrette, un chef d'orchestre, M. Boris de Vinogradow, et deux auditeurs, M. Jacques Durandeaux et Mlle Geneviève Huerre.

Nous les remercions tous très vivement pour leur collaboration; grâce à l'intérêt et à la diversité des réponses reçues, nous avons pu réaliser le rapprochement et la confrontation de conceptions voisines, concordantes ou divergentes, ce qui était le but de ce « carrefour d'idées », afin d'éclairer des facettes différentes du phénomène qui nous intéresse tous : la musique.

Un fait semble assez significatif pour être signalé : nous n'avons reçu aucune réponse des personnalités de disciplines extra-musicales, artistiques ou scientifiques, à qui nous avions adressé le même texte, exception faite des deux auditeurs. Manque de temps? Manque de documentation? Indifférence?

M. Henry BARRAUD

I. Un moyen d'expression, à travers un langage, et à l'intérieur d'une discipline artistique, variable d'une œuvre à l'autre.

II. Heurté en aucune manière. Touché parfois, quand elle me semble bonne. Intéressé en toutes circonstances.

III. Oui, je le pense et je le souhaite. Sinon elle disparaîtra sans que nul songe à s'en affliger.

IV. Elle fait appel à tout cela, selon des dosages subtils et assez mystérieux qui sont particuliers à chaque créateur.

V. Je n'ai d'hostilité envers aucune expérience nouvelle. Je prends celle-ci très au sérieux et je ne pense pas qu'elle puisse appauvrir le langage musical si elle est menée par de vrais musiciens. Si des amateurs ou des médiocres s'imaginent que les ordinateurs auront du talent à leur place, ils auront de grandes déconvenues.

Pour répondre dans les termes mêmes de la question, il ne me semble pas impossible que certains enrichissements puissent sortir de ces expériences. Une révolution? Je ne le crois pas.

M. François-Bernard MACHE

... Je suis en opposition avec deux affirmations que vous avancez préalablement à vos cinq questions. La première est que l'art a « quitté depuis longtemps le domaine du sacré où il trouva son sens et sa fonction pendant des millénaires ». Je me permets de vous renvoyer à mon article sur Xenakis paru dans le tome I de l'Encyclopédie des Musiques Sacrées[1]; je pense au contraire que l'art quitte la fonction essentiellement profane à laquelle la Renaissance l'a le plus souvent assujetti depuis le XVIe siècle, pour retrouver un rôle sacré, c'est-à-dire de lien entre l'homme et l'universel conçus comme un tout à l'intérieur d'un monisme (matérialiste ou non peu importe).

Deuxièmement je pense, contrairement à ce que vous dites, que l'audience des artistes contemporains est dans l'absolu et quantitativement plus grande qu'elle ne l'a jamais été.

Voici maintenant quelques réponses :

I. La musique est le lieu des rapports entre la pensée et les sons. Lorsqu'elle se replie sur elle-même pour se constituer en langage (tonal, sériel, modal, etc...) elle se coupe du réel sonore et se limite à une communication humaniste de structures codées. Si à l'inverse elle se confond avec les sons bruts (le cas ne s'est pas encore vraiment présenté, mais mon œuvre Rituel d'Oubli pose ce problème), elle cesse de penser pour ne vivre que d'une sensibilité animale. La musique est un équilibre sans cesse remis en cause entre le son et la pensée, pour donner à entendre la vérité des sons. C'est dire que selon moi elle ne peut être considérée ni comme un langage (elle est pour l'essentiel au-delà des structures linguistiques); ni comme un mode d'expression (le compositeur n'est qu'un médium); ni comme une discipline artistique au sens strict (les œuvres ne sont qu'un cas particulier, privilégié, de l'activité ou de l'attitude musicale); ni enfin une discipline scientifique (savoir, et non science, la musique s'adresse à la totalité de l'être, et non seulement à l'outil spécialisé qu'est l'intelligence logique; mais la science est une arme efficace que la musique peut utiliser avec la désinvolture qui convient).

II. Je suis compositeur.

III. La musique est, comme toute création authentique, révolutionnaire par essence. Elle est un des repères pour l'humanité sur le chemin de sa réconciliation avec le monde.

IV. La création artistique, et musicale en particulier, fait appel à l'intelligence, à la conscience, à l'inconscient, à l'intuition, à la sensibilité, à la sensualité, etc... etc... La musique, avec les autres arts linguistiquement indéterminés (arts visuels) est le seul lieu où la pensée peut s'épanouir dans sa totalité.

V. Dans la mesure où la musique a besoin de moyens scientifiques pour faire avancer sa logique (ce que j'appelle son contenu « linguistique »), elle peut se servir des ordinateurs au même titre que d'une grammaire génératrice ou de n'importe quoi d'autre de ce genre. Mais, à ma connaissance, l'usage des ordinateurs suppose une quantification des éléments musicaux, leur réduction à des paramètres, ou à un code binaire. Or je pense que cette démarche réclame une extrême prudence et que l'élément premier de la musique n'est pas un *quantum* quelconque mais un *quale,* c'est-à-dire un rapport qualificatif entre des quanta : jusqu'ici on n'a pas su combler le vide entre ceux-ci et celui-là, et la démarche structuraliste, généralisation de la phonologie, c'est-à-dire une démarche rigoureuse mais purement qualitative, que j'ai personnellement entreprise depuis quelques années, me paraît provisoirement plus apte à rendre compte des structures musicales que leur quantification forcément incomplète (dans le domaine des timbres par exemple). De plus il ne faut pas oublier que tout enrichissement excessif du langage musical masque ce qui dans la musique va au-delà du langage, et qui fait le lien avec le foisonnement incontrôlé du réel. Si on croit en effet, comme c'est mon cas, qu'il y a dans toute réalité infiniment plus de complexité que dans le plus complexe des ordinateurs, et que l'acte musical est essentiellement un déchiffrement du réel — découverte de la musique latente dans les bruits du monde, et non invention de structures artificielles — on pensera que l'usage le plus intéressant d'un ordinateur ne sera pas d'en faire un outil de création, par combinaison de signes conventionnels, mais d'analyse pour l'élaboration de modèles de plus en plus précis du monde sonore, à partir desquels l'acte de création lancera toujours, au-delà de cette logique enrichie, un pari beaucoup plus vaste que toute logique.

M. Maurice OHANA

I. Un langage.

II. Je me sens concerné, intéressé, touché, la musique contemporaine est la seule vraie, aujourd'hui.

III. Oui certes; malheur aux peuples sans musique.

IV. La composition musicale fait appel : 1° à l'intuition; 2° à la sensibilité; 3° à l'inconscient; 4° à l'intelligence : c'est un médiumnisme.

V. Pas un enrichissement, ni un appauvrissement, ni une révolution : c'est comme la photographie par rapport à la peinture.

M. LUIS DE PABLO

I. La recherche d'un langage en évolution perpétuelle, à l'intérieur duquel puissent coexister, avec un sens différent, tous les horizons sonores créés — ou encore à créer — par l'homme.

II. Comme compositeur, je suis une part de celle-ci. Dans ma mesure, je suis responsable : je *dois* trouver la musique dont la naissance m'attend.

III. J'en suis sûr : autrement je m'en désintéresserais; mais je crois que cette fonction sociale est sur le point de changer. Ce changement, d'ailleurs, doit arriver non pas seulement de la part du compositeur, mais aussi grâce à des transformations infiniment plus générales.

IV. Je crois qu'on ne peut pas répondre à cette question d'une façon précise. Cela dépendra de chaque compositeur, de chaque société l'entourant, en un mot de la variété infinie des circonstances humaines. L'homme vit simultanément la sensibilité, l'intelligence, l'intuition, l'inconscient, et aussi la physiologie, cette dernière n'étant pas du tout négligeable : tous motivent l'art. Aucun parmi eux ne saurait prétendre être la seule voie. Le vrai portrait d'une époque est composé par les multiples réponses données par les créateurs aux problèmes composant un moment historique donné.

V. Je suis sûr que l'emploi des ordinateurs en musique est positif. Je ne crois pas, en revanche, que cette voie-là soit la seule possible dans notre moment. Mais en fait, l'utilisation de ces systèmes est *déjà* un enrichissement des moyens sonores. Cependant, je n'accepte pas la régression de langage qui semble être la conséquence d'un emploi maladroit de ces mêmes systèmes. Toute recherche doit s'orienter vers une évolution positive de la matière employée. L'ordinateur est capable, je crois, de transformer aussi bien la matière elle-même, que les rapports entre le créateur et l'œuvre créée. Mais trop souvent le compositeur se contente de ce dernier aspect, en négligeant le premier. Cependant ce n'est pas la faute du système, mais de ceux qui l'emploient mal. Mais il y a aussi des exemples très positifs.

Enfin, je veux aussi ajouter que toute évolution suppose un enrichissement dans un sens, et un appauvrissement dans un autre. Nous devons accepter ce fait si nous ne voulons pas tomber dans la stérilité.

M. Antoine TISNE

I. La musique est une discipline artistique destinée à traduire un monde sonore propre à chaque compositeur. Ce monde sonore varié peut exprimer une idée, une image, voire même une pensée. L'art étant une réalisation d'essence humaine, il doit permettre dans sa conception totale la participation complète de celui qui l'édifie.

II. La musique contemporaine demeure une nécessité urgente de chaque jour; elle s'inscrit dans le contexte historique d'une civilisation en perpétuelle évolution. Elle nous propose un reflet de nos préoccupations diverses, des drames et des inquiétudes modernes, de nos espérances aussi. Depuis dix ans elle prend peu à peu sa place au sein de notre société par le truchement des cinémas d'art et d'essai, des radios et des télévisions, à l'extérieur des salles de concert.

Si un obstacle persiste, celui-ci est dû à l'absence de « curiosité », à la paresse de l'esprit nées des habitudes et des attachements exagérés aux œuvres du passé, qui sont utilisées parfois à des fins comparatives.

Comme le créateur, le véritable auditeur doit se sentir « concerné » par cette aventure proposée, et doit adhérer à cet engagement. La musique contemporaine, par son rôle et sa vocation, doit se manifester dans une collaboration soutenue avec les autres arts, constituant une action dans un ensemble cohérent et indissoluble.

Les techniques et les langages n'étant que des matériaux et non des fins en eux-mêmes, il est nécessaire que ces moyens soient de plus en plus nombreux et développés. Ces moyens anciens ou nouveaux prennent leur sens et leur signification en fonction de la personnalité créatrice qui les animera afin d'édifier son œuvre.

III. En corollaire à cette précédente question, la musique constitue un phénomène social; le temps n'est plus où elle représentait l'apanage d'une élite choisie d'initiés, de spécialistes, de professionnels. Cette « tour d'ivoire », ce vase clos, équivaudraient aujourd'hui à son étouffement, et à une mort certaine.

Sans rejeter les moyens sonores traditionnels dont la mission est loin d'être définitivement accomplie, il faut, afin d'assurer le rayonnement futur, apporter un sang nouveau : concevoir des instruments permettant d'accéder à des univers insoupçonnés. A ce propos, l'électronique et la musique concrète proposent un vocabulaire neuf, une conception hardie et passionnante du langage sonore, aux côtés des moyens plus connus. Quelle sera demain la direction des compositeurs et de leur musique conçue avec l'aide des ordinateurs?

IV. La création artistique et la composition musicale en particulier font appel, selon mon expérience, et le relevé de mes observations, à la sensibilité et à l'intelligence, autrement dit à l'intégration totale du créateur (ses aspirations, ses dons de coloriste, de poète et d'architecte en musique).

V. L'introduction des ordinateurs utilisés dans la composition musicale représente une expérience captivante de notre époque, et sur laquelle il faut s'attarder sans rejeter sa présence comme son importance. L'artiste créateur doit prendre conscience de la gravité que représente l'ingérence de la machine dans la réalisation de son œuvre.

1. Éditions Labergerie.

La création étant avant tout un acte de liberté, c'est-à-dire le moyen de permettre à l'homme de s'exprimer et de s'épanouir, cette œuvre de création remplit sa fonction lorsque la vibration totale de l'artiste y est incorporée. C'est une projection, un jaillissement vers une possibilité de devenir. C'est un miroir destiné aux autres hommes, dans lequel ils désireront percevoir un « reflet » de leur visage.

La présence de l'ordinateur est un apport considérable qu'on ne saurait dédaigner. A l'allure avec laquelle évoluent les sciences électroniques, il est à souhaiter que ces ordinateurs puissent être enrichis d'éléments complémentaires susceptibles d'attirer des compositeurs nantis de talents et de personnalités.

Malgré ces perspectives éloquentes, octroyer une trop grande importance à la « machine » peu à peu envahissante, ce serait conditionner l'artiste en l'écartant des lois naturelles qui régissent l'équilibre normal de l'univers.

Peut-être cherchons-nous à ériger un art nouveau destiné à une civilisation future, ou bien s'agit-il d'une expérience provisoire de l'art en mutation. Il est difficile de se prononcer. L'artiste trouvera-t-il assez de force et de courage pour imposer la suprématie de son cerveau sur les moyens formidables qui seront mis à sa disposition ?

Pour ma part, je trouve ici, une forme d'expérience captivante parmi tant d'autres, mais ma condition de créateur libre m'invite à adopter à cet égard une attitude de prudente expectative.

M. Antoine GOLEA[1]

I. La musique représente pour moi avant tout un mode d'expression, en second lieu une discipline artistique, en troisième lieu un langage. Elle ne représente en aucun cas une discipline scientifique.

II. Je suis, de toujours, vivement intéressé et touché par la musique contemporaine.

III. Je suis persuadé de la fonction sociale permanente et sans cesse croissante de la musique. Jusqu'au XVIIIe siècle, en Occident, les compositeurs étaient des serviteurs; prince, pape ou prélat, le maître payait son compositeur pour fournir des œuvres de circonstance; les œuvres étaient donc faites pour un public donné, et il est à noter que jusqu'à la fin du XVIIIe siècle, on ne jouait que de la musique contemporaine, qui correspondait au langage musical accessible à une certaine société. En conquérant sa liberté, le musicien est devenu un solitaire, il ne connaît plus son public et s'isole dans ses recherches. A notre époque, le langage musical et les techniques se sont diversifiés à l'extrême, et le décalage entre compositeurs et public va s'accentuant. Le mandarinat d'une certaine musique incompréhensible à la masse rejette cette masse vers la chanson et les variétés, seule expression musicale qui lui soit accessible. Cependant il apparaît impossible d'écrire une musique accessible à tous sans être obligé à des concessions destructrices, car il ne peut y avoir une seule musique valable pour tout le monde. Pourtant la musique est faite pour être écoutée, comprise, aimée. La solution de ce problème se trouve sans doute dans une éducation musicale intelligente, qui, en initiant l'enfant à la musique contemporaine en même temps qu'à celles du passé, évitera de le fermer irrémédiablement à l'expression musicale de son temps.

Le XXe siècle voit le retour du mécénat sous une forme anonyme et collective; les musiciens ont une fonction dans le monde musical, sont employés, comme interprètes, professeurs, administrateurs, etc... par des organismes publics ou privés. Les compositeurs reçoivent des commandes de l'État ou de fondations privées, bref dans une certaine mesure ils sont redevenus des fonctionnaires employés par des maîtres dont les goûts orientent forcément leurs activités. Il se développe des modes qui s'étendent comme une épidémie, celle du canular par exemple. En face de ce phénomène, la recherche individuelle, indépendante de tous les excès, prend sa pleine valeur.

IV. Cela dépend des créateurs, de leur nature, de leur tempérament. Toutes les facultés citées peuvent tour à tour entrer dans le processus de la composition musicale, et aussi, à des degrés divers, en même temps.

V. Je suis violemment hostile à l'emploi des ordinateurs dans la composition musicale. C'est une facilité : un compositeur peut ainsi « faire de la musique » sans avoir la connaissance nécessaire de la musique du passé, sans avoir étudié les bases du langage musical. Pour établir un programme, il doit trouver une idée, qui peut nécessiter de l'intelligence, mais exclut tout rôle de l'inspiration. Il prévoie et oriente le déroulement des opérations, mais confie à la machine la réalisation effective de la composition. Le travail dans le détail fait partie intégrante de l'acte de création artistique du compositeur; l'abandonner à la machine, c'est une démission.

Le rôle des machines de toutes sortes dans notre société est de plus en plus envahissant; si l'homme accepte la mécanisation d'un si grand nombre de ses activités, ne peut-il pas se réserver, dans son intégralité, un domaine qui est un des plus riches champs d'activité de l'esprit, celui de la création artistique ?

Cela dit, je me sens incapable de déceler le rôle à venir des ordinateurs dans la composition musicale; d'une façon générale, il me paraît assez vain de vouloir jouer les prophètes en cette matière, comme en toute autre d'ailleurs.

1. Les réponses aux questions 3e et 5e ont été rédigées par Nicole Lachartre, en résumé d'un entretien avec Antoine Goléa.

M. Claude HELFFER

I. Je ne peux réduire la musique à une seule catégorie. Étant interprète, je constate que je vis dans la musique; ce qui me frappe de prime abord est donc « l'existence » de la musique en tant que je peux fonder ma vie sur elle. Puis, selon les besoins que j'ai, je l'envisage sous des angles différents; si je veux comprendre intellectuellement, je l'assimilerai à un langage, et je l'étudierai comme une discipline scientifique, mais je pourrai aussi me poser des questions sur ce qui est vivant en elle, tout ce qui est expression, communication.

II. Tout une partie de mon travail est consacrée à la musique contemporaine. Pourquoi ? Parce que la musique n'est pas seulement quelque chose du passé, parce que je vois qu'il se crée de la musique de nos jours. Vivant à une époque donnée, j'ai à assumer ce que produit mon époque, ce qu'elle crée de nouveau, en particulier sa musique. En le faisant, je m'aperçois qu'il n'y a pas de solution de continuité entre la musique du passé et la musique actuelle, mais que dans les nombreuses œuvres qui voient le jour, il y a celles qui apportent quelque chose et celles qui ressassent ce qui a déjà été exprimé. Le fait d'être interprète m'oblige à creuser les œuvres, à les jouer, à les rejouer, et, presque par un critère d'endurance, à voir ce qui tient le coup. Une œuvre, telle une sonate de Boulez, que j'arrive à jouer cinquante ou soixante fois, me semble forcément valoir la peine d'être continuée à jouer. Mon attitude vis-à-vis de la musique contemporaine ? Un intérêt passionné.

III. Plus je vis dans le domaine de l'art, moins j'arrive à être satisfait des théories plus ou moins philosophiques; je constate que dans tous les pays du monde, on arrive à réunir des gens autour de la musique : aux dernières semaines musicales internationales de Paris, on s'est écrasé aux concerts de musique contemporaine, spécialement un public jeune. J'en déduirai que la musique a et aura encore une fonction sociale, mais ce n'est qu'après coup que l'on pourra dire ce qu'aura été cette fonction.

IV. La création artistique, autant que je puisse en juger de l'extérieur, fait appel à l'homme tout entier : chaque époque accentue plus ou moins tel facteur : notre époque, après les abus du post-romantisme, insiste plus sur ce qui est raisonnement, construction, intelligence, ce qui ne veut pas dire que le reste n'existe pas.

V. Je ne vois pas pourquoi il faudrait réprouver l'emploi des ordinateurs dans la composition musicale. L'ordinateur ne fait qu'exécuter plus rapidement et mieux ce que l'on a toujours demandé au cerveau humain. Prenons un exemple : des deux œuvres de piano de Xenakis, je vois peu de différence entre « Herma », écrite à la main, et la cadence d'« Eonta », faite avec l'aide d'un ordinateur IBM. Tout vient de la programmation et c'est là qu'on distinguera le bon du mauvais compositeur. La machine n'invente rien, elle ne fait qu'effectuer les opérations qu'on lui demande : comme il me semble qu'un des principaux attributs du compositeur est d'effectuer des choix devant ce qui se présente, la machine multiplie les possibilités de choix. Elle ne peut donc être un facteur d'appauvrissement pas plus qu'apporter une révolution dans le langage. S'il y a révolution, ce sera plutôt dans le mode de « composer » de la musique.

De même que le scientifique isolé tend à disparaître, peut-être le compositeur fera place à une équipe, comme le suggère Pierre Barbaud dans son livre récent. Attendons l'avenir avec confiance.

Mlle Danielle SEVRETTE

I. La musique est pour moi le dialogue d'une âme avec une autre âme, en aucun cas une discipline mais une manifestation de la vie, non pas un langage mais au-delà du langage, une communication à travers le temps et l'espace entre deux êtres humains ou entre un être humain et une collectivité s'il s'agit de folklore.

II. Je me sens concernée par la musique contemporaine comme par tout mode d'expression traduisant ou trahissant l'attitude d'un être humain face à notre époque. Je suis heurtée quand cette musique est la caricature volontaire ou non de recherches sincères (l'inconscience n'est pas une excuse et je considère la raillerie comme une manifestation d'impuissance). Je peux être intéressée, touchée ou indifférente suivant mon état de réceptivité au moment de l'audition, des affinités que je peux avoir avec le compositeur et de la « force » de l'œuvre écoutée.

III. Pour répondre à cette question je dois d'abord indiquer qu'il y a pour moi deux manifestations musicales possibles : 1° la musique issue d'une collectivité, c'est-à-dire le folklore et dans cette catégorie on trouve des œuvres spontanément nées pour répondre à un besoin conscient ou non de cette collectivité, dans un langage musical assimilé par elle : dans ce cas il y a fonction sociale de la musique. 2° La musique dite savante, élaborée par un seul individu, moyen d'expression que de tous temps les hommes ont essayé d'asservir à des fins utilitaires (par incapacité de concevoir sa puissance propre ? par intérêt ? par peur d'un phénomène « magique » qu'ils ne contrôlaient pas ?); leurs efforts ont été voués à l'échec, parce que la musique n'est pas faite de données fixées une fois pour toutes et universellement acceptées, parce qu'on ne peut l'agencer à volonté pour un but artificiellement fixé à l'avance, mais qu'elle est une des manifestations possibles de l'essence la plus secrète d'un individu, manifestation qui apparaîtra sous l'effet de certaines stimulations, mais qui transcende son origine. Si certaines œuvres de commande sont des chefs-d'œuvre, c'est qu'il y a eu rencontre entre la fonction et l'expression.

Une de ces rencontres particulièrement fécondes a eu lieu pour la musique religieuse, mais il est caractéristique de noter que c'est dans un domaine spirituel où l'être humain peut se dépasser.

Je conclurai en indiquant que même s'adressant à une collectivité, le message d'un artiste est reçu individuellement au moment de l'audition, l'influence de la collectivité sur l'auditeur n'ayant une grande incidence que dans la mesure où la personnalité de celui-ci est faible.

IV. Je pense que la création musicale est l'expression de l'inconscient contrôlé par l'intelligence, la mise en éveil de l'inconscient pouvant être faite par les réactions de la sensibilité à l'expérience, à l'action ou à d'autres sentiments moins nobles, tels que l'opportunisme, etc... mais le mélange doit être très variable suivant les compositeurs et les époques.

V. Je réagis par l'intérêt et l'inquiétude à l'emploi de l'ordinateur dans la musique; intérêt pour les possibilités que donne à l'homme toute mécanisation; inquiétude, car c'est peut-être un moyen de démission devant la recherche, un risque de fuite devant ses responsabilités. Il est difficile de dire si cela sera une révolution, ou si la révolution n'est pas déjà faite, l'ordinateur en étant l'aboutissement. La musique sera en fin de compte le résultat du programme conçu par le musicien et pas plus que pour l'emploi de toute autre technique il ne pourra masquer l'absence de génie créateur.

M. Boris de VINOGRADOW

I. La musique est, pour moi, non seulement un art, un moyen de s'exprimer, mais surtout un mode de pensée. Un langage? Non, puisque tout langage peut me toucher, s'il est justement « pensé ». La notion de langage est bien trop restreinte.

II. Pourquoi opposer musique contemporaine à... à quoi, au fait? Certaines musiques me concernent, qu'elles soient de Monteverdi ou de Boulez, d'autres m'indiffèrent (celles des Vivaldi de toutes époques, par exemple). Je hais surtout les conventions stérilisantes.

III. Détachée de sa fonction sociale, la musique n'a plus de raison d'être, naguère comme demain. Elle n'est que trop souvent reflet de la société dans laquelle elle évolue, alors qu'elle devrait en être une des forces agissantes.

IV. La composition me semble être cas d'espèce, fonction de l'œuvre, fonction du compositeur. Haro sur une planification organisée de la composition, faisant appel à l'une ou plusieurs des qualités énumérées dans le questionnaire! Il me paraît hors de doute que l'intelligence (ou la sensibilité, ou autre chose) peut être chez l'un une qualité, chez l'autre un grave défaut, lorsqu'elle devient partie intégrante d'une structure musicale.

V. Pourquoi se priver du précieux concours de l'ordinateur pour l'établissement du matériau de base, si celui-ci reste soumis à une pensée créatrice organisée, et, à la base, humaine, à quelque échelon que ce soit. Seul compte le résultat. Le danger est évidemment, comme pour toute autre forme de technique musicale, de confier ces appareils à des mains malhabiles, ou pire, malhonnêtes de néo-apprentis sorciers essayant de suppléer à leur imagination créatrice par une pensée machinisée en trompe-l'œil.

M. Jacques DURANDEAUX[1]

I. La musique est une construction de sons; la musique au sens le plus général est l'ensemble des architectures sonores.

II. Concerné : terme trop imprécis.
Intéressé : oui.
Touché : la musique, ce n'est pas de la confiture.
Indifférent : incompatible avec « intéressé ».
Heurté : ce serait que j'ai des idées a priori sur ce que doivent être des constructions sonores.

III. Fonction sociale? oui, comme toutes les *œuvres de civilisation* au sens freudien du mot.

IV. Faux problème, fausse question étant donné ce que j'ai répondu au premier; je refuse l'alternative : ou bien l'intelligence, ou bien la sensibilité. Dès qu'un homme construit, il est tout entier dans le moindre de ses gestes, dans la moindre de ses œuvres.

V. Des ordinateurs, puisqu'il s'agit de construire, pourquoi pas?

Mlle Geneviève HUERRE[2]

I. La musique représente pour moi une manière d'exprimer — mais elle est par sa forme même une discipline comme tout art, car elle fait part non de la réalité seule mais d'une réalité simplifiée et embellie par l'esprit.

II. Intéressée par la musique contemporaine, car on ne peut être indifférent aux recherches de son époque.

Touchée : non jusqu'à présent. Il me semble qu'elle dispose de moyens techniques gigantesques mais que personne ne peut vraiment contrôler.

III. Non je ne pense pas que notre société fasse de l'art une fonction sociale. Les préoccupations intellectuelles et artistiques semblent étrangères et gênantes, pour la société technique qui est la nôtre.

IV. La création artistique à mon avis fait appel à la sensibilité et à l'intuition, mais constamment contrôlées par l'intelligence. Je ne crois pas qu'un artiste, même doué, puisse faire une œuvre de valeur et donc universelle sans intelligence.

V. En partie déjà vue à la question deux; les moyens existent et il dépend de l'artiste d'en faire un enrichissement ou un appauvrissement dans son art. Un académisme peut être remplacé par un autre qui n'est pas meilleur. Supprimer des fausses valeurs est une heureuse solution, mais les remplacer par des moyens techniques n'est peut-être pas une réussite. L'avenir jugera.

1. M. Jacques Durandeaux est docteur ès philosophie.
2. Mlle Geneviève Huerre est licenciée ès science.

M. J. PIOCH directeur des relations publiques à la Bull-General Electric

I Un langage.
II Intéressé.
III Oui.
IV A la sensibilité et à l'intelligence.
V Ma réaction est celle de l'approbation et je pense que cette expérience est susceptible d'apporter un enrichissement du langage musical.

M. Devy ERLIH violoniste

I La musique représente pour moi à la fois un mode d'expression et une discipline artistique.

II Je me sens évidemment concerné car ma vie en dépend, intéressé car il est impossible de participer sans cela, et enfin touché car cette quête éternelle vers un but inconnu de tous, que tous contestent et ont toujours contesté, est très émouvante.

III Quant à la fonction sociale de la musique, il me semble évident qu'elle se maintiendra comme elle l'a toujours fait malgré — et pourquoi pas — à cause de ses innombrables transformations.

IV S'il est une chose impossible, je crois, à analyser, c'est bien le processus de la création artistique. Tout l'être y est certainement intimement lié, et il me paraît bien vain d'essayer d'en déterminer les composantes.

V Je connais trop mal les ordinateurs pour me permettre de préjuger de leur utilisation. Il faut faire confiance à l'esprit humain qui les a conçus, il saura s'en servir convenablement — espérons-le. Après tout ils ne sont qu'un moyen technique supplémentaire mis à la disposition du musicien. S'il semble évident que l'ordinateur ne donnera de talent à personne, on peut penser que s'il peut aider certains créateurs à résoudre les problèmes qui se posent à eux, ou même à les dépasser, ils auraient tort de ne pas se servir d'un tel outil de travail. De toute façon, la finalité demeure l'œuvre achevée, et non les moyens employés pour la réaliser.

POUR EN SAVOIR DAVANTAGE :

Chapitre II
L.A. Hiller and L.M. Isaacson.
Experimental Music. Mac Graw Hill Book Company, Inc. 330 West 42 Nd Street New York.
L.A. Hiller Technical Report No. 18.
Music Composed with Computer. An Historical Survey.
University Of Illinois — School of Music — Experimental Music Studio.
Revised MUSICOMP Manual, written and edited by L.A. Hiller, Jr, and A. Leal. May 1966.

Chapitre III
La musique, discipline scientifique. Pierre Barbaud. Dunod Éditeur. Paris, 1968.
Initiation à la composition musicale automatique. Pierre Barbaud. Dunod Éditeur. Paris, 1966.

Chapitre IV
Musiques formelles. Iannis Xenakis. Éditions Richard-Masse, 1963, 7, place Saint-Sulpice, PARIS-6e.
Gravesaner Blätter. Articles de Iannis Xenakis :
nº 6 Calcul des Probabilités en musique,
nºs 11 et 12 A la recherche d'une musique stochastique,
nºs 18 à 23 Éléments de musique stochastique,
nº 26 Programme en Fortran de Musique stochastique,
nº 29 Vers une philosophie de la musique.
Bulletin d'information nº 23, 1966, Boosey and Hawkes, 4, rue Drouot, PARIS-9e. Xenakis musicien d'avant-garde (entretien avec Mario Bois).
Iannis Xenakis et la musique stochastique, la revue musicale, carnet critique nº 257. Éditions Richard-Masse, 7, place Saint-Sulpice, Paris-6e.

Vers une métamusique. Iannis XENAKIS. La Nef nº 29. Tendance des Arts Lettres, 1967. Éditions Tallandier, 17, rue Rémy-Dumoncel, Paris-14e.
La pensée de XENAKIS par Daniel Charles BOOSEY and Hawkes Éditeur.
Iannis XENAKIS parle — disque de la collection d'Hommes d'Aujourd'hui (nº 55) — Réalisation sonore Hugues Desalle, 4, Villa du Pont-de-Grenelle, Paris-15e.

Chapitre V
Generation of Music by a Digital Computer.
M.V. MATHEWS and N. GUTTMAN. Proceedings 3rd International Congress on Acoustics. Editor : L. Cremer.
An Acoustic Compiler for Music and Psychological Stimuli.
M.V. MATHEWS The Bell System Technical Journal, vol. XL, nº 3, May 1961.
Musical sounds from Digital Computers.
M.V. MATHEWS, J.R. PIERCE and N. GUTTMAN. Gravesaner Blätter, vol, VI, 1962.
Computer Study of Trumpet Tones. J.C. RISSET. Bell Telephone Laboratories, Incorporated Murray Hill, New-Jersey.
Graphical Language for the Score of Computer-Generated Sounds. M.V. MATHEWS and L. ROSLER. Bell Telephone Laboratories, Incorporated Murray Hill, New-Jersey.

Chapitre VI
A propos des mécanismes de création esthétique extrait de Cybernética nº 2, 1967. Association Internationale de Cybernétique, Namur.
La certitude et la foi. La Revue Musicale carnet critique nº 257. Éditions Richard-Masse, 7, place Saint-Sulpice, Paris-6e, 1963.
La musique et les machines. Cahiers d'étude de radio-télévision nos 27-28. Situation de la recherche. Flammarion Éditeur, 1960.
Vingt ans de musique. Revue d'esthétique nº 4, 1967, rédaction : 16, rue Chaptal, Paris-9e.

Chapitre VII
Gottfried Michael KOENIG. Project 1. Studio voor Elektronische Muziek Plompetorengracht 14-16, Utrecht, Hollande.
A propos de l'ordinateur dans la musique. Le monde de la musique. Vol. IX, nº 3, 1967. Édition Bärenreiter 19 *bis*, rue de Vanves, Boulogne-sur-Seine.

Chapitre VIII
Mathematische Musikanalyse und Randomfolgen. Musik und Zufall. Gravesaner Blätter, 1962.
Mathematical Analysis of Formal Structure of Music. IRE Transactions on Information Theory. Vil. IT-8, nº 5, Seite 225, 1962.
Mathematische Analyse von Formalstrukturen von Werken der Musik. Arbeitsgemeinschaft für Forschung des Landes NRW, Heft 124, 1963, Westdeutscher Verlag Köln und Opladen.
Uber mathematische Musikanalyse. Nachrichtentechnische Zeitschrift, 17, 1964, I, Seite 41-47.

Chapitre IX
A. MOLES : Musiques expérimentales. Édition du cercle d'Art contemporain. Paris, 1960.
Théorie de l'information et perception esthétique. Flammarion Éditeur, 26, rue Racine, Paris-6e, 1958.
The New Relationship between music and Mathematics. Gravesaner Blätter 23-24 1962.
La musique algorithmique, première musique calculée. Revue du son 93 (I), 1961.

Chapitre X
Une partie des renseignements contenus dans ce chapitre sont extraits d'un ouvrage publié par Lejaren A. Hiller :
Technical Report nº 18. Music composed with computer. An Historical Survey, février 1968. L.A. HILLER. University of Illinois. School of Music. Expérimental Studio.

* * *

ÉTUDES ET DOCUMENTS

LES OPÉRATIONS PLANÉTAIRES

LES TRAJECTOIRES PLANÉTAIRES

Pour envoyer une sonde vers une planète, il faut commencer par lui faire quitter la région du système solaire où l'attraction de notre planète est prépondérante; il s'agit d'une sphère d'environ un million de kilomètres de rayon. Dans cette zone de l'espace on doit décrire le mouvement d'un objet non par rapport au Soleil mais relativement à la Terre.

Le moyen de faire quitter la sphère d'action de la Terre à un engin est bien connu depuis longtemps des balisticiens : il suffit de lui communiquer une vitesse supérieure à la vitesse de libération.

Cette vitesse de libération est aussi connue sous le nom de seconde vitesse cosmique (la première est la vitesse d'un satellite sur une orbite circulaire à l'altitude considérée). Elle décroît très rapidement lorsqu'on s'éloigne de la Terre : ainsi elle vaut 11 200 m/s à la surface terrestre, et seulement 1 400 m/s à 400 000 km d'altitude. Cela pourrait faire penser qu'on a intérêt à envoyer d'abord l'engin loin de notre planète, puis à lui communiquer seulement la vitesse de libération. Mais en fait le coût total de cette opération serait très nettement supérieur à celui d'une création directe de la vitesse de libération près de la Terre.

On a donc intérêt à communiquer la vitesse de libération à l'engin à basse altitude. Pour cela on procède selon la technique désormais classique du lancement en deux temps : dans une première étape l'engin et un bloc propulseur sont placés sur une orbite d'attente basse; puis en un point déterminé de cette orbite le bloc propulseur est mis en marche et crée une vitesse supérieure à la vitesse de libération.

Le coût du placement sur l'orbite d'attente est pratiquement une constante et la véritable vitesse caractéristique d'une opération planétaire est celle qu'il faut communiquer au véhicule à partir de l'orbite d'attente. Pour les exemples numériques que nous serons amenés à donner, nous prendrons comme référence une orbite d'attente à 235 km, altitude à laquelle correspond une vitesse de libération de 11 000 m/s.

Lorsqu'une vitesse supérieure à la vitesse de libération lui a été communiquée, l'engin ne quitte pas tout de suite la sphère d'action de la Terre. Il lui faut tout d'abord s'éloigner à un million de kilomètres. Pour cela il décrit dans la zone d'influence terrestre une branche d'hyperbole. Si l'engin possède exactement la vitesse de libération, il lui faut très longtemps pour gagner les confins de cette zone. Mais si sa vitesse au départ est supérieure de quelques centaines de m/s à la vitesse de libération, ce qui est le cas courant ainsi que nous le verrons, quelques jours lui suffisent pour arriver à un million de kilomètres de la Terre.

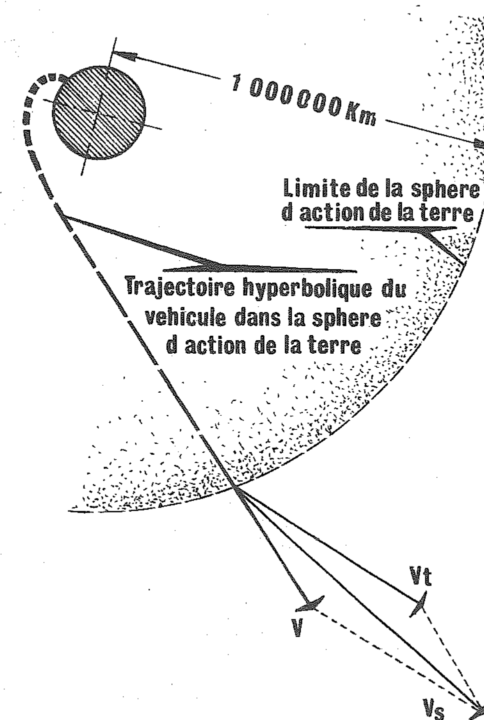


Fig. 1. — *Lorsqu'on communique à un véhicule spatial une vitesse supérieure à la vitesse de libération, il décrit une branche d'hyperbole dans le domaine terrestre avant de quitter la sphère d'action de la Terre avec une vitesse résiduelle v. Cette vitesse se compose avec la vitesse propre Vt de la Terre sur son orbite (30 km/s) pour donner la vitesse d'injection Vs de l'engin dans le système solaire. Ce sont la grandeur et la direction de Vs qui déterminent l'orbite solaire sur laquelle évoluera le véhicule.*

DANS LE SYSTÈME SOLAIRE

Ensuite son mouvement est principalement régi par l'attraction du Soleil.

Lancé exactement avec la vitesse de libération, un engin possède une vitesse nulle à la sortie de la sphère d'action de la Terre. Il reste donc à un million de kilomètres de la Terre et se déplace sur une orbite solaire identique à celle de notre planète. Le placement d'engins sur de telles trajectoires serait intéressant pour la surveillance de l'environnement terrestre. Il est envisagé pour l'avenir.

Mais en pratique l'engin est animé d'une vitesse supérieure à la vitesse de libération et il possède une vitesse non nulle à sa sortie de la zone d'influence de la Terre. Soit V la vitesse qui a été communiquée au véhicule à une altitude où la vitesse de libération est V_1, et v la vitesse qu'il possède à sa sortie de la sphère d'action. Ces trois vitesses sont liées par la relation :

$$v^2 = V^2 - V_1^2$$

La vitesse résiduelle v est celle du véhicule par rapport à la Terre lorsqu'il quitte sa sphère d'action.

Mais l'engin se trouve désormais dans la zone d'influence du Soleil, et il faut donc considérer sa vitesse par rapport au Soleil : elle s'obtient simplement en composant suivant la règle du parallélogramme la vitesse résiduelle par rapport à la Terre et la vitesse de notre planète sur son orbite, soit environ 30 km/s.

C'est cette vitesse par rapport au Soleil qui détermine entièrement les paramètres de la trajectoire que décrira l'engin dans le système solaire. Si sa grandeur est comprise entre 0 et 42 km/s, le véhicule décrira une ellipse. Si elle est supérieure à 42 km/s — vitesse de libération du Soleil au niveau de l'orbite de la Terre —, l'engin parcourra une hyperbole qui l'amènera un jour à quitter le système solaire. Il va sans dire qu'essentiellement c'est le cas elliptique qui nous intéressera.

Mais ce n'est pas tout de placer un engin planétaire sur une orbite solaire. Encore faut-il que cette trajectoire convienne à sa mission, c'est-à-dire qu'elle le fasse passer à proximité de la planète qu'il doit étudier.

Formellement le problème est le suivant : il faut que la sonde coupe la trajectoire de la planète visée en un point qu'atteindront simultanément l'engin et l'astre. Cette trajectoire une fois déterminée, on en déduit les caractéristiques du lancement. Remarquons que ce problème est celui que pose le rendez-vous autour de la Terre de deux vaisseaux cosmiques. Cela vient de ce que l'on a en fait à assurer un rendez-vous autour du Soleil entre une sonde et une planète.

LES ELLIPSES DE HOHMANN

Bien que mathématiquement son principe soit simple, la détermination de trajectoires convenables réclame de longs calculs numériques qui ne peuvent être effectués qu'avec l'aide de puissants ordinateurs.

Ces calculs montrent que, quel que soit le jour où l'on veut lancer un engin vers une planète, il existe une infinité de trajectoires possibles différant par la durée du voyage, et l'énergie qu'elles réclament. Pour des raisons évidentes d'économie, on se limite pratiquement à la trajectoire qui demande l'énergie la plus basse. On constate alors que cette énergie minimale, pour un jour donné, est en général très élevée. En conséquence, comme les possibilités des lanceurs sont très limitées, on est obligé de se restreindre à ceux des jours qui correspondent à une énergie minimale, ce qui réduit considérablement les occasions de lancement.

Pratiquement donc on est amené à chercher non une trajectoire quelconque, mais celle qui est parmi toutes la plus économique.

Un modèle un peu simplifié du système solaire va nous permettre de montrer ce qu'est cette trajectoire. Supposons en effet que les orbites des planètes autour du Soleil soient des cercles coplanaires ayant comme rayons les distances moyennes des planètes au Soleil. Les trajectoires réelles des planètes ayant une excentricité très petite et une faible inclinaison sur l'écliptique (plan de l'orbite de la Terre), cette approximation est assez bonne.

Tableau I. **Caractéristiques des trajectoires de Hohmann en direction des planètes**

	D	S	P	V	T
MERCURE	57,9	116 jours	81 jours	13,33 km	105 jours
VÉNUS	108,2	584 jours	88 jours	11,33 km/s	146 jours
TERRE	149,6	—	—	—	—
MARS	228	780 jours	96 jours	11,48 km/s	259 jours
JUPITER	778	398 jours	107 jours	14,08 km/s	2,73 années
SATURNE	1 427	379 jours	112 jours	15,05 km/s	6,05 années
URANUS	2 869	369 jours	114 jours	15,77 km/s	16,12 années
NEPTUNE	4 497	367 jours	115 jours	16,05 km/s	30,6 années
PLUTON	5 910	366 jours	116 jours	16,16 km/s	45,5 années

D - distance moyenne (exprimée en millions de kilomètres) de la planète au Soleil.
S - période synodique de la planète.
P - temps séparant le jour J de la conjonction inférieure de la planète (pour Mercure et Vénus) ou de son opposition (pour les planètes supérieures).

On montre alors que la trajectoire strictement la plus économique est une demi-ellipse tangente à la fois à l'orbite de la Terre et à celle de la planète visée. Les trajectoires de ce type sont appelées ellipses de Hohmann.

La durée du transfert le long d'une orbite de Hohmann est imposée par les lois de la mécanique céleste : elle vaut la moitié de la période de révolution d'un mobile qui décrirait la totalité de l'ellipse.

Le voyage durant exactement une demi-révolution sur l'ellipse de Hohmann, le point d'arrivée du véhicule sur l'orbite de Vénus est opposé par rapport au Soleil à la position de la Terre au moment du départ. Et il faut que la planète y arrive en même temps que l'engin. L'engin doit donc quitter la Terre alors que l'astre visé se trouve dans une position telle que tous deux mettent le même temps (la durée du voyage de l'engin) pour gagner le point de rencontre de leurs trajectoires. Cela impose que l'on effectue le lancement alors que la Terre et la planète visée se trouvent dans des positions relatives bien déterminées. Or les positions relatives de la Terre et d'une planète changent constamment car leurs périodes de révolution autour du Soleil sont différentes. Les mêmes positions relatives se retrouvent toutefois au bout d'un intervalle de temps appelé « période synodique » de la planète considérée. Un lancement selon une ellipse de Hohmann ne peut donc avoir lieu qu'une seule fois par période synodique de la planète visée.

Un jour particulier de la période synodique d'une planète est celui où la planète et la Terre sont alignées du même côté du Soleil : c'est la conjonction de la planète et de la Terre. Le jour où un tir selon une ellipse de Hohmann est possible est repéré par rapport à la conjonction de la Terre et de l'astre visé.

Pour placer un engin sur une ellipse de Hohmann il faut lui assurer une vitesse/résiduelle colinéaire à la vitesse de la Terre autour du Soleil. Ainsi sa trajectoire sera tangente à celle de notre planète. Et il faut ajuster cette vitesse en grandeur pour que le contact avec l'orbite de la planète visée soit également assuré.

Si l'on veut atteindre une planète intérieure, il faut que la vitesse résiduelle se retranche de la vitesse de la Terre, et il faut donc « tirer » dans le sens contraire au mouvement de notre planète. Par ailleurs la trajectoire de l'engin sera extérieure à celle de la planète. Cette dernière se déplacera donc en moyenne plus vite que la sonde, et parcourra plus d'une demi-révolution pendant le voyage de l'engin. En conséquence le départ devra avoir lieu avant la conjonction.

En revanche si l'on vise une planète extérieure, il faudra lancer l'engin dans le sens du mouvement de la Terre et le faire après la conjonction.

LES FENÊTRES PLANÉTAIRES

Avec le modèle simplifié du système solaire que nous avons considéré, nous avons vu que le lancement vers une planète ne pouvait se faire dans les conditions les plus économiques qu'une seule fois par période synodique de l'astre visé.

C'est encore vrai dans la réalité. Et, ce qui est remarquable, la position par rapport à la conjonction de ce jour le plus favorable pour un lancement est très proche de celle calculée grâce au modèle simplifié. En outre les caractéristiques de la trajectoire de transfert qui lui correspond sont très voisines de celles de l'ellipse de Hohmann. On voit donc tout l'intérêt de ce modèle simplifié que nous avons utilisé précédemment.

Par la suite nous donnerons le nom de jour « J » au jour le plus favorable à un lancement. Compte tenu de la faible excentricité des orbites des planètes, sa position varie légèrement d'une période synodique à l'autre.

Si l'on examine la courbe donnant l'énergie minimale nécessaire à un tir vers une planète en fonction de la date de départ, on constate évidemment qu'elle possède un minimum au jour « J », mais aussi qu'au voisinage de ce jour l'augmentation de l'énergie est d'abord très lente. Il en résulte qu'un lancement encore assez économique peut intervenir dans une période assez large où l'énergie reste voisine de l'énergie minimale atteinte le jour J. Cette période est appelée « fenêtre planétaire ». Elle dure selon la planète visée de quelques jours à quelques semaines axés sur le jour J.

La partie droite de la fenêtre (c'est-à-dire celle qui suit le jour J) est particulièrement intéressante. Elle correspond en effet à des voyages sensiblement plus courts que celui commençant au jour J. Or, comme nous le verrons plus loin, le temps est un ennemi des engins planétaires. Une réduction de la durée du voyage justifie donc une légère augmentation de son coût. En revanche un lancement avant le jour J se traduirait par un voyage plus long qu'il ne vaudrait vraiment pas la peine de payer plus cher.

Remarquons que les trajectoires correspondant à des lancements pendant une fenêtre planétaire sont très voisines des ellipses de Hohmann puisqu'elles ne sont que très légèrement sécantes aux orbites de la Terre et de la planète visée.

DANS LA SPHÈRE D'ACTION DE LA PLANÈTE

Comme au début de son voyage il avait quitté la sphère d'action de la Terre, à l'issue de son vol l'engin pénètre dans la sphère d'action de la planète qu'il vise. Et sa trajectoire est alors tout

à fait symétrique de celle qu'il avait suivi peu après son départ. L'engin pénètre dans la sphère d'action de la planète. A l'intérieur de cette dernière il est donc animé d'une vitesse supérieure à la vitesse de libération, et il décrit une hyberbole par rapport à l'astre. Après l'avoir fait passer à une certaine distance de l'astre, cette hyperbole fait normalement ressortir l'engin de la sphère d'action. Il se replace alors sur une orbite solaire. Il a simplement effectué un « survol » de la planète. Selon l'hyperbole décrite par l'engin, la distance de survol sera plus ou moins grande.

Si un simple survol ne suffit pas pour la mission scientifique de la sonde, cette dernière peut utiliser un moteur pour freiner sa course et se placer sur une orbite autour de l'astre.

L'engin peut aussi pénétrer dans l'atmosphère de la planète pour aller se poser à sa surface. Pour cela il suffit que son hyperbole assure un survol théorique à une distance du centre de la planète inférieure à son rayon.

LES CORRECTIONS DE TRAJECTOIRE

Théoriquement pour une expérience planétaire, il devrait y avoir au plus deux phases propulsées. Tout d'abord le lancement. Et ensuite, seulement pour une mise sur orbite planétaire, un freinage à la fin du vol.

Le transfert Terre-planète devrait être purement balistique.

Mais le lancement est entaché obligatoirement d'une certaine imprécision. Une erreur de 1 m/s est un bon ordre de grandeur de la vitesse finale de la fusée porteuse. Elle se traduirait par un écart de 30 000 km au terme d'un voyage Terre-Vénus, et par 70 000 km à l'issue d'un vol Terre-Mars.

Or de tels écarts sont inacceptables, aussi bien pour une mission scientifique impliquant le survol à faible distance d'une planète, que pour une mise sur orbite ou une arrivée en douceur.

C'est pourquoi en pratique de petites manœuvres sont nécessaires pendant le transfert : ce sont les corrections de trajectoire.

Les éléments de la correction sont calculés par les stations au sol. Ils sont au nombre de trois.

C'est tout d'abrod le point de la trajectoire où doit avoir lieu la manœuvre. Il est plutôt choisi que calculé. Et ensuite il s'agit de la grandeur et de la direction de l'impulsion que devra créer la sonde pour se transférer sur une trajectoire passant en moment voulu par un point donné de la région de la planète visée.

Les trajectoires avant et après correction sont toujours très voisines. Aussi l'impulsion à créer est faible : moins de 100 m/s pour une erreur au départ de quelques m/s.

La création de l'impulsion n'est pas un problème difficile. Comme elle est faible, il suffit de doter la station d'un petit moteur (représentant 5 à 10 % de sa masse totale).

Le problème est plutôt que l'impulsion soit donnée dans une certaine direction, et donc que l'engin puisse s'orienter sur commande dans n'importe quelle position. Il doit donc disposer, d'une part d'un référentiel, et d'autre part d'un système de stabilisation précis.

En pratique une correction de trajectoire peut être contrôlée à quelques cm/s près en grandeur, et à une minute d'arc en direction.

Cette précision permet de viser un point des régions de Mars ou de Vénus à quelques centaines de kilomètres près.

MARS ET VÉNUS, PREMIERS OBJECTIFS

Le tableau 1, montre que deux planètes se signalent très nettement : Vénus et Mars.

En effet les vitesses nécessaires, à 235 km d'altitude, pour les atteindre selon une ellipse de Hohmann, sont respectivement de 11,33 km/s et 11,48 km/s; elles sont donc à peine supérieures à la seconde vitesse cosmique. Par ailleurs, les durées des voyages de Hohmann vers ces planètes sont relativement courtes : 146 jours pour Vénus, et 259 jours pour Mars.

Seule Mercure pourrait être atteinte plus vite le long d'une ellipse de Hohmann : en 105 jours seulement. Mais le coût du lancement le plus économique vers Mercure est de 13,33 km/s, ce qui se traduirait pour une même masse sur orbite basse par une réduction d'un facteur cinq dans la charge utile par rapport à Vénus ou Mars.

En ce qui concerne les autres planètes, le lancement serait très onéreux : plus de 14 km/s pour Jupiter. Et les voyages les plus économiques seraient très longs. Seuls de nouveaux modes de propulsion permettront d'aller vers ces planètes en empruntant des trajets certes coûteux mais rapides.

Pour toutes ces raisons Vénus et Mars devaient être les premiers objectifs de l'astronautique planétaire, et ils resteront peut être encore longtemps les seuls.

DES FENÊTRES ESPACÉES

Si le coût des lancements vers Vénus et Mars est peu élevé, c'est parce que ces planètes se déplacent sur des orbites assez voisines de celle de la Terre.

La Terre évolue autour du Soleil sur une orbite ayant un périhélie de 147,1 millions de kilomètres, et un aphélie de 152,1 millions de kilomètres.

Vénus décrit en 224,7 jours une trajectoire qui s'approche jusqu'à 107 475 000 km du Soleil et s'en éloigne jusqu'à 108 942 000 km. Cette orbite est inclinée de 3° 23' 40" sur l'écliptique.

Quant à Mars, elle se déplace sur une ellipse de 206 657 000 km de périhélie et de 249 221 000 km d'aphélie. L'inclinaison du plan de cette orbite sur l'écliptique est de 1° 50' 59"'. Cette trajectoire est décrite en 779,94 jours.

Les orbites de la Terre et de Vénus sont presque parfaitement circulaires : leurs excentricités respectives sont seulement de 0,0167 et de 0,0068. En conséquence on pourrait penser que l'approximation de Hohmann est excellente pour Vénus. En fait elle est bonne sans plus à cause de l'inclinaison relativement importante de l'orbite de Vénus sur l'écliptique. Cette inclinaison perturbe sensiblement le calcul du voyage le plus économique. En particulier la durée de celui-ci varie selon la position qu'occupe Vénus au moment de sa rencontre avec l'engin : si à ce moment Vénus est très près d'un nœud de son orbite (point où la trajectoire de Vénus coupe le plan de l'orbite de la Terre), le vol s'effectue pratiquement dans le plan de l'orbite terrestre et est très proche d'un voyage de Hohmann; il dure donc environ 146 jours. Si, en revanche, Vénus est loin de ses nœuds, une importante impulsion doit être donnée au départ perpendiculairement à l'orbite de la Terre et le voyage le plus économique est plus coûteux que dans le premier cas; mais il peut ne durer que de 100 à 120 jours.

La partie droite de la fenêtre vénusienne dure environ un mois. Elle s'étend donc approximativement entre 60 et 30 jours avant la conjonction.

L'approximation de Hohmann est moins bonne pour Mars que pour Vénus. En effet si l'orbite de Mars est moins inclinée sur l'écliptique, son excentricité est beaucoup plus grande : elle vaut 0,093. Il en résulte une dispersion assez grande dans les durées des voyages les plus économiques vers la planète rouge : elles se situent selon les fenêtres entre 180 et 250 jours. Les fenêtres martiennes sont un peu plus courtes que les vénusiennes: leur partie droite dure à peu près deux semaines après le jour le plus favorable qui se situe en moyenne 78 jours après une conjonction.

Le fait que Mars et Vénus soient relativement proches de nous a un avantage considérable : les voyages vers ces planètes sont économiques. Mais il est également à l'origine d'un petit inconvénient : en effet les deux planètes ont évidemment une période de révolution assez voisine de celle de la Terre, et elles se déplacent donc relativement lentement par rapport à notre planète; cela signifie qu'elles ont une longue période synodique (584 jours pour Vénus et 780 jours pour Mars), et donc que les occasions de lancer des engins vers ces planètes sont rares.

Cela ne facilite pas d'ailleurs la mise au point des engins destinés à l'étude de ces astres. Dans l'astronautique paraterrestre, les savants avaient en effet pris l'habitude de faire grandement appel à l'expérience et de lancer de nombreux prototypes avant de mettre au point un véhicule spatial. Ce n'est évidemment pas possible au stade des expériences planétaires : en dix ans il n'y a que cinq possibilités de lancer un engin vers Mars et il convient de franchir à chaque fois une étape importante si l'on veut progresser rapidement.

Le tableau 2 donne les jours les plus favorables pour des tirs vers Mars et Vénus.

UNE PLANÈTE MYSTÉRIEUSE

Si elle lui est équivalente du point de vue du coût du lancement, Vénus possède sur Mars un avantage certain: la durée du voyage économique est bien plus courte que celle du vol de Hohmann vers Mars.

PLANÈTE	DATE DU LANCEMENT	DURÉE DU VOYAGE	VITESSE A CRÉER A 235 KM D'ALTITUDE
MARS	2 mars 1969	178 jours	11 540.m/s
	24mai 1971	210 jours	11 340 m/s
	30 juillet 1973	192 jours	11 790 m/s
	15 septembre 1975	206 jours	11 960 m/s
	19 novembre 1977	224 jours	11 890 m/s
	19 novembre 1979	244 jours	11 550 m/s
	5 janvier 1982	202 jours	11 500 m/s
VÉNUS	13 janvier 1969	126 jours	11 480 m/s
	19 août 1970	116 jours	11 520 m/s
	28 mars 1972		
	12 novembre 1973	108 jours	11 730 m/s
	11 juin 1975	142 jours	11 430 m/s

Tableau II. **Les mêmes conditions se retrouvent après 8 ans pour Vénus et 15 ans pour Mars.**

En conséquence Vénus était à priori la planète la plus favorable pour des expériences planétaires. Et ce fait est d'autant plus intéressant que l'étude de cette planète est très difficile à entreprendre depuis la Terre.

Cela peut paraître paradoxal : Vénus est en effet la planète qui s'approche le plus de nous, à 40 millions de kilomètres parfois, et on pourrait penser que son étude par télescope ou par radio-télescope est très facile. Il n'en est rien. Tout d'abord pour une raison astronomique : Vénus étant une planète intérieure, lors de sa conjonction elle nous montre sa face non éclairée, et elle est donc vue dans de très mauvaises conditions pour une observation optique. On constate d'ailleurs que les meilleures possibilités pour étudier la planète sont effertes aux astronomes un peu plus d'un mois avant la conjonction alors que Vénus se trouve à quelques 67 millions de kilomètres de la Terre. Mais même alors ce n'est qu'un mince croissant brillant qui se prête aux observations. Et il y a plus grave : avec les instruments optiques il est possible d'observer le sol de la planète car cette dernière apparaît toujours entourée d'une épaisse atmosphère nuageuse.

En conséquence, pendant très longtemps, on a simplement su que la planète avait un rayon d'environ 6 100 km et que sa densité était voisine de 5. C'était très peu, mais pour beaucoup ces caractéristiques voisines de celles de notre planète suffisaient pour faire apparaître Vénus comme une planète sœur de notre Terre. Comme Vénus se trouvait plus près du Soleil que notre planète, ils pensaient simplement qu'elle était plus chaude (45° à 60°C), et ils l'imaginaient sous la forme d'un modèle de la Terre à l'ère primaire.

Cela jusque vers 1950, avénement de la radio-astronomie.

Ensuite toutes ces belles théories s'effondrèrent car les mesures effectuées au moyen de radio-télescopes donnèrent comme résultats des températures de 200 °C, 300 °C, ou même 400 °C. Ce n'était pas du tout ce qu'on attendait! Mais même la radio-astronomie ne permit pas de conclure exactement car les mesures réalisées sur différentes longueurs d'onde conduisirent à des valeurs différentes, correspondant d'ailleurs sans doute à des altitudes diverses dans l'atmosphère vénusienne,

En revanche un succès incontestable de la radio-astronomie a été la détermination en 1966 — grâce au gigantesque radio-télescope d'Arecibo, à Porto-Rico, dont le diamètre atteint 230 m — de la période de rotation de Vénus : 246,1 jours dans le sens rétrograde. Ce résultat remarquable était très attendu car dans les siècles passés les estimations de cette période de rotation avaient variées entre 1 jour et 400 jours...

Mais même dans ce domaine tout n'est pas encore dit. En utilisant le télescope du pic du Midi des spécialistes français ont obtenu des images qui selon eux ne laissent aucun doute : l'atmosphère de Vénus tourne dans le sens rétrograde en 4 jours. Alors? La planète et son atmosphère ne tourneraient pas ensemble? Ce ne serait pas impossible.

En fait seuls les engins planétaires permettront d'élucider cette question et toutes les autres que pose encore Vénus.

LA PLANÈTE ROUGE

La situation de Mars n'est pas du tout la même. La planète rouge est en effet une planète extérieure qui, lors de la conjonction, présente aux observateurs toute sa face éclairée. Remarquons toutefois que les conjonctions ne sont pas également favorables : si parfois, Mars, s'approche à 57 millions de kilomètres, d'autres conjonctions la voit rester à 100 millions de kilomètres. Cela est dû à la forte excentricité de l'orbite de Mars. Une conjonction très favorable se produit environ tous les 17 ans.

Comme en outre Mars n'est entourée que d'une mince atmosphère, sa connaissance était déjà bien avancée au temps où seule l'astronomie traditionnelle permettait son étude. C'est ainsi que l'on avait appris que son rayon équatorial était de 3 415 km et son rayon polaire de 3 392 km, la précision de ces mesures étant de 5 km. En outre une carte ayant une définition de 50 km avait pu être tracée par l'astronome Focas à l'aide de la lunette de 60 cm de l'observatoire du pic du midi. Par ailleurs la durée du jour martien avait pu être fixée avec une très grande précision : 24 h 37 mm. Et la température de la surface de Mars avait pu être mesurée au moyen de bolomètres : en moyenne elle varie dans la journée entre + 5 °C et — 45 °C; elle peut toutefois sans doute atteindre + 30 °C l'été près de l'équateur, et descendre jusqu'à — 100 °C la nuit.

Est-ce à dire que l'étude de Mars par des engins spatiaux serait superflue? Non, bien au contraire, car elle seule permettra de répondre aux nombreuses et passionnantes questions qui se posent à la suite des observations optiques de la planète. Ainsi seuls des véhicules posés à la surface de Mars pourront dire si les alignements de taches qu'on a longtemps pris pour des canaux et qui manifestent une variation saisonnière sont composés d'organismes vivants.

DEUX ENNEMIS : LE TEMPS ET LA DISTANCE

Les lancements vers Vénus et Mars sont à peine plus coûteux qu'en direction de la Lune. Cela a d'ailleurs permis aux expériences planétaires de commencer très tôt, avant même qu'un homme ait volé dans l'espace : les lanceurs développés pour les premières opérations lunaires pouvaient en effet envoyer des sondes vers les planètes proches.

Mais si les départs vers Vénus et Mars d'une part, et vers la Lune d'autre part, posent des problèmes équivalents, il n'en est plus de même des voyages proprement dit vers ces astres. Les vols vers Vénus et Mars soulèvent en effet deux importants problèmes entièrement nouveaux par rapport aux expériences lunaires.

LE PROBLÈME DE LA FIABILITÉ

Le premier de ces problèmes tient à la durée des voyages : au moins des mois, alors que les vols vers la Lune ne demandent que quelques jours. Il fallait donc franchir un échelon dans la qualité de l'appareillage spatial pour que les engins planétaires soient à même de fonctionner convenablement pendant la totalité de leur mission. Et cela était d'autant plus difficile que les sondes planétaires doivent remplir des missions très délicates, et doivent donc être très complexes.

Un véhicule planétaire comprend toujours des dizaines d'appareils eux-mêmes constitués par des milliers de composants élémentaires. Nous allons examiner ce qui se passe à chacun de ces stades du point de vue de la fiabilité.

En premier lieu intéressons-nous aux composants élémentaires : résistances, capacités, transistors. Considérons une catégorie à la sortie de l'usine. Au fur et à mesure que le temps s'écoule, certains composants tombent en panne. Pour caractériser le comportement de l'ensemble des composants considérés, introduisons son « taux de défaillance » : c'est la fraction des composants de l'ensemble qui cessent de fonctionner normalement en une heure. La courbe du taux de défaillance en fonction du temps possède trois parties très nettes : tout d'abord elle décroit; cela correspond à la période où cessent de fonctionner les composants qui avaient un défaut de fabrication; ensuite elle est constante; les défaillances des éléments sont alors purement aléatoires; enfin elle croît, passe par un maximum, et décroît jusqu'à s'annuler; cette dernière partie correspond à la mort électronique par vieillissement des composants; son début correspond à la durée de vie de la plupart des composants.

L'existence de la première partie de la courbe montre qu'il est nécessaire de faire subir aux composants un vieillissement artificiel à la sortie de l'usine pour éliminer ceux qui ne sont pas bons. Par ailleurs, il faut s'assurer que la durée de vie de la plupart des composants dépassera la durée de la mission demandée à la sonde. Mais en pratique elle est toujours très grande et le problème ne se pose pas.

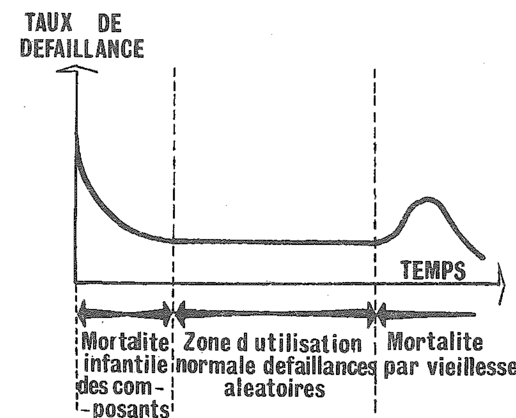


Fig. 2. — *Courbe typique donnant le taux de défaillance d'un ensemble des composants électroniques élémentaires.*

C'est donc dans la partie constante de la courbe que les composants sont utilisés. La valeur du taux de défaillance dans cette zone caractérise donc bien leur qualité : c'est donc elle que nous appellerons désormais taux de défaillance. Selon la nature des composants elle varie aux États-Unis entre 10^{-7} et 10^{-8} par heure.

LE COEFFICIENT DE CONFIANCE

Ce que l'on désire en fait connaître, c'est la probabilité d'un composant de fonctionner pendant toute la durée de la mission. Nous appellerons ce facteur coefficient de confiance du composant pour la mission. Il est très simplement lié au taux de défaillance et à la durée du vol.

Pour fixer les idées, nous considérons l'exemple d'un voyage vers Mars qui demande un fonctionnement d'un an environ.

Pour un tel vol, le coefficient de confiance d'un élément ayant un taux de défaillance de 10^{-7} est de 99,9 %. Entendons que le composant a une chance sur mille de ne plus fonctionner au bout d'un an. Si le taux de défaillance est de 10^{-8}, le coefficient de confiance pour la même mission atteindra 99,99 %.

Passons maintenant au stade de l'appareil. Nous considérerons l'exemple d'un organe contenant 1 000 composants élémentaires. Si la défaillance d'un seul de ses composants provoque la mise hors service de tout l'appareil, le coefficient de confiance de ce dernier sera tout simplement le produit de ceux de tous ses composants : ainsi pour la mission considérée le coefficient de confiance de l'appareil sera de 0,37 si les éléments ont un

taux de défaillance de 10^{-7}, et de 0,9 s'ils ont un taux de 10^{-8}. La différence est considérable.

La sonde se compose de plusieurs dizaines d'appareils. Mais seuls un certain nombre d'entre eux sont vitaux, c'est à dire entraînerait du seul fait de sa propre défaillance l'échec de toute la mission. Un organe vital est par exemple le système de communication. En revanche un instrument scientifique n'en est pas un. Remarquons toutefois qu'il ne faut pas négliger les organes non vitaux : ainsi lorsqu'un appareil scientifique se dérègle, la sonde continue de fonctionner mais l'intérêt de la mission diminue beaucoup.

Supposons donc que notre engin contienne dix organes vitaux composés chacun de mille éléments. Sa probabilité de fonctionner au bout d'un an ne sera que de 0,05 % si les composants élémentaires ont un taux de défaillance de 10^{-7}. Autant dire que la mission est vouée à l'échec... Si le taux de défaillance est de 10^{-8} pour les composants, le coefficient de confiance de notre sonde sera de 0,37. Ce n'est pas encore très brillant. Et pourtant un taux de 10^{-8} par heure correspond à une excellente qualité encore rarement atteinte pour les composants : si la courbe du taux de défaillance était partout constante à une valeur de 10^{-8}, cela équivaudrait pour le composant à une espérance de vie de 15 000 ans (l'espérance de vie est la durée au bout de laquelle le composant n'a qu'une chance sur deux de fonctionner).

Alors que faire ?

LA MÉTHODE DE LA DUPLICATION

Dans le cas ou le taux est de 10^{-8}, doublons chacun des dix organes vitaux. Le coefficient de confiance d'un des couples d'appareils est alors de 0,99, et celui de la sonde complète atteint 0,9. C'est assez bon, mais nous avons dû doubler la masse du véhicule.

Si le taux de défaillance des éléments est de 10^{-7}, même en doublant les appareils vitaux on n'arrive encore qu'à une probabilité de succès de la mission de 1 %. Est-ce à dire qu'avec des éléments ayant un taux de défaillance de 10^{-7} on ne peut espérer réussir une mission d'un an vers Mars ?

On le peut, mais il faut encore changer l'agencement du véhicule. Partageons chaque appareil en dix sous-organes contenant chacun 100 composants, doublons chacun des sous-organes, puis doublons encore chacun des organes vitaux. Les coefficients de confiance valent alors : 99,9 % au stade du composant, 90 % au niveau du sous-organe, 99 % pour le sous-organe doublé, 90 % au stade de l'organe, 99 % à celui de l'appareil doublé, et enfin 90 % pour la sonde complète. Le problème est donc résolu, mais on a du quadrupler la masse du véhicule, et considérablement augmenter sa complexité : on doit en effet prévoir des commutations pour passer en cas de panne d'un appareil à son double. Remarquons toutefois que la présence de commutateurs ne diminue pas sensiblement la fiabilité de la sonde car pour que la panne de l'un d'entre eux ait une influence, il faudrait que l'appareil et le commutateur associé cessent tous deux de fonctionner, ce qui est très improbable.

Si les composants avaient un taux de défaillance supérieur à 10^{-7}, pour assurer le succès de la mission, il faudrait effectuer une duplication encore plus près de la base, par exemple dès le stade du sous-sous-organe de dix composants.

La technique apparaît donc la suivante : d'abord prendre les composants les meilleurs possibles; ensuite, effectuer toutes les duplications nécessaires sur des ensembles de plus en plus petits jusqu'à ce que le coefficient de confiance devienne satisfaisant. Paradoxalement la complexité accrue qui résulte de ces opérations est un facteur de sécurité.

En outre, notons que l'on peut lancer plusieurs sondes : ainsi, si l'on envoie deux véhicules ayant chacun un coefficient de confiance de 90 %, la probabilité qu'un au moins remplisse avec succès la mission est de 99 %. Mais cette technique n'est intéressante que si l'on dispose déjà d'engins individuellement fiables. L'utilisation de plusieurs engins de mauvaise qualité ne servirait à rien : deux sondes ayant chacune un coefficient de confiance de 0,37 n'ont ensemble que 64 chances sur 100 de mener à bien la mission.

LES COMMUNICATIONS INTERPLANÉTAIRES

Le second problème nouveau posé par les engins interplanétaires concerne la distance. Au moment où une sonde atteint Vénus, la distance Terre-Planète est en effet de quelque 60 millions de kilomètres. Pour Mars elle peut atteindre 250 millions de kilomètres. Or l'engin doit se faire entendre. Plus précisément l'exécution d'une mission exige la transmission à la terre de tous les renseignements recueillis par les appareils scientifiques embarqués. Pour cela un certain débit d'informations est nécessaire : son importance dépend du nombre et de la nature des renseignements à envoyer. Ce débit s'exprime habituellement en bits/seconde ou bauds, le bit étant l'information unitaire (par exemple un point ou un trait en télégraphie).

A titre indicatif voici les débits nécessaires pour transmettre :

— la télévision : 1 000 000 bauds,

— la parole : 2 000 bauds,

— une photographie comprenant un million de points transmise en 30 minutes : 5 000 bauds,

— une photographie comprenant 1 000 000 de points transmise en 24 h : 100 bauds,

PUISSANCE D'ÉMISSION	ÉLOIGNEMENT DE L'ENGIN 100 millions de km (Vénus)	300 millions de km (Mars)	1 milliard de km (Jupiter)	6 milliards de km (Pluton)
1 W	16 bauds	1,6 baud	—	—
10 W	160 bauds	16 bauds	1,6 baud	—
100 W	1 600 bauds	160 bauds	16 bauds	—
1 kW	16 000 bauds	1 600 bauds	160 bauds	0,74 baud
10 kW	160 000 bauds	16 000 bauds	1 600 bauds	74 bauds

Antenne de bord : 3 m de diamètre — Température de bruit : 30 °K

Antenne de réception : 26 m de diamètre — Fréquence d'émission : 3 000 MHz

Tableau III. — *Débit d'information maximal en fonction de la puissance d'un engin planétaire et de sa distance.*

— des informations scientifiques et télémétriques : 1 à 100 bauds.

La notion de débit est capitale car la puissance nécessaire pour une transmission est proportionnelle au débit. Et tout le problème des communications planétaires est une question de puissance. N'oublions pas en effet que l'énergie reçue par une antenne terrestre est inversement proportionnelle au carré de la distance. Or la puissance d'émission d'un engin planétaire (dont l'alimentation électrique exige une puissance environ dix fois supérieure à celle rayonnée par l'antenne) est limitée à quelques dizaines de watts, ou au mieux à quelques centaines de watts. C'est dire que les puissances reçues sur Terre seront toujours extrêmement faibles.

Ainsi pour un émetteur de 12 W — Mariner 4 ne disposait que de 10 W, la puissance ayant été portée à 20 W sur les Mariners de 1969 — situé à 100 millions de kilomètres, la puissance reçue par mètre carré de surface d'antenne sur la Terre n'est que de 10^{-22} W...

Pour tirer le meilleur parti de ces faibles puissances, il faut mettre en œuvre, tant sur les engins qu'au sol, des moyens très évolués.

DE GIGANTESQUES ANTENNES

Le premier de ces moyens a été l'utilisation d'antennes directionnelles, c'est-à-dire d'antennes qui n'émettent que dans un cône axé sur une direction déterminée. Les propriétés de directivité d'une antenne sont caractérisées par un facteur appelé « gain » qui est le coefficient d'économie de puissance que l'on réalise en l'utilisant plutôt qu'une antenne omnidirectionnelle. Le modèle le plus simple d'antenne directionnelle est le réflecteur parabolique. Si son rayon d'ouverture est R, son gain G pour la longueur d'onde L est donné par la formule :

$$G = 4\ R^2/L^2$$

En pratique la coutume s'est instaurée d'exprimer le gain en décibels :

$$G \text{ décibels} = 10 \log (G \text{ normal})$$

Ainsi un gain de 100 correspond à 20 dB.

Les antennes directionnelles, montées sur les engins planétaires, ont des dimensions qui sont limitées. Elles ne sauraient en effet être trop lourdes. Et surtout elle doive rayonner dans un cône ayant un angle d'ouverture nettement supérieur à la précision du système d'orientation. Or plus l'antenne est grande, plus son faisceau est étroit.

Malgré cela les antennes des engins ont déjà des gains très appréciables : ainsi un paraboloïde de 3 m de diamètre — les antennes montées sur les premières sondes planétaires soviétiques avaient cette dimension — autorise un gain de 900 (29 dB) pour les fréquences habituellement utilisées (environ 3 000 MHz).

Au sol les stations de poursuite sont, pour leur part, dotées d'antennes gigantesques.

Les Américains disposaient dès 1962 à Goldstone (Californie), à Woomera (Australie), et à Johannesburg (Afrique du Sud), de réflecteurs de 26 m de diamètre dont les gains pour la fréquence de 3 000 MHz sont de 70 000 (48 dB). En 1966 ils ont mis en service à Goldstone une antenne de 63 m dont la gain est proche de 450 000 (56 dB). Et une antenne géante du même type va pouvoir être utilisée à Tidbinbilla (Australie).

Quant aux Soviétiques ils disposent principalement en Crimée d'une station d'écoute comportant trois grandes antennes disposées au sommet d'un triangle équilatéral de 10 km de côté. Chacune de ces antennes est constituée par huit réflecteurs paraboliques de 15 m de diamètre placés côte à côte, en deux rangées, sur un cadre mobile.

Il ne semble pas que des antennes beaucoup plus grandes seront réalisées car leur construction poserait des problèmes pratiquement insolubles. On a en effet déjà eu beaucoup de mal à réaliser des réflecteurs pesant plus de 1 000 t et ne devant pas, malgré les contraintes auxquelles ils sont soumis du fait de leur masse et des perturbations atmosphériques, subir des déformations dépassant le cent-millième de leur diamètre... Sans compter que de telles antennes doivent pouvoir rester pointée à une fraction de minute près en direction d'un engin qui peut se déplacer rapidement dans le ciel.

LA LUTTE CONTRE LE BRUIT DE FOND

Malheureusement une antenne ne recueille pas seulement les émissions de la station, mais également celles de toutes les sources de rayonnement électromagnétiques qui se trouvent dans son cône de réception et qui émettent sur la même longueur d'onde que l'engin. C'est ce qu'on appelle le « bruit de fond ». Son importance est caractérisée par un facteur, sa « température », que l'on exprime en degrés Kelvin (cela se justifie car la source de bruit la plus importante est l'agitation thermique).

On a, bien sûr, intérêt à réduire le plus possible le bruit de fond.

Certaines sources de bruit se trouvent sur la Terre. Il s'agit d'abord du sol, dont la température de bruit atteint 300 °K. On évite son rayonnement en utilisant des antennes très directionnelles et en ne communiquant avec les engins que lorsqu'ils sont hauts sur l'horizon. Certains objets comme les démarreurs d'automobiles ou certaines constructions comme les lignes à hautes tensions sont également des sources de bruit. On réduit leur influence en plaçant les stations d'écoute dans des régions isolées, voire désertiques.

D'autres parasites trouvent leurs origines dans les radio-sources que constituent de nombreux corps célestes. La plus importante radio-source est le Soleil dont la température de bruit atteint 30 000 °K. Les autres sont principalement situées dans la Voie Lactée. Bien sûr les seules radio-sources qui interviennent sont celles qui se trouvent dans l'étroit faisceau de l'antenne. Et comme elles sont toutes parfaitement localisées, la trajectoire de la station peut être choisie telle que sa projection sur la voûte céleste évite les plus importantes. Ainsi on peut ramener la température du bruit d'origine galactique à moins de 10 °K.

Par ailleurs les amplificateurs utilisés dans les stations de réception ne sont pas parfaits, et ils constituent une autre source de parasites. On caractérise donc la qualité d'un amplificateur par la température de son « bruit propre ». Les amplificateurs usuels à lampes ont des températures de bruit de plusieurs milliers de degrés Kelvin. Si on n'avait disposé que d'eux, les télécommunications interplanétaires auraient été impossibles. Heureusement ces dernières années sont apparus deux nouveaux types d'amplificateurs parfaitement adaptés à la réalisation de telles liaisons. Il s'agit tout d'abord des amplificateurs paramétriques qui utilisent des diodes semi-conductrices et pour lesquels la température de bruit est inférieure à 100 °C. Et surtout le Maser — sigle de « Microwawe Amplifiers by Stimulated Emission of Radiation » — a permis de descendre à moins de 10 °K.

La température totale du bruit reçu par une antenne peut donc actuellement être abaissée à 20 ou 30 °K.

Toutes choses égales par ailleurs, le bruit de fond a pour conséquence de limiter le débit d'information pour un engin planétaire.

Le tableau 3 donne les débits maximums possibles en fonction de la distance d'émission et de la distance. Cela pour une antenne de bord de 3 m de diamètre, une station d'écoute ayant un réflecteur de 26 m, une température de bruit de 30 °K, et une fréquence de 3 000 MHz. L'utilisation d'une antenne de 64 m permet de multiplier par 7 ces débits d'information.

Les premières sondes planétaires avaient une puissance d'émission d'environ 10 W. Cela autorisait la transmission depuis Vénus et Mars de signaux télémétriques, d'informations scientifiques, ainsi que l'envoi très lent de photographies.

Lors de la prochaine décennie on espère aux États-Unis pouvoir utiliser des émetteurs de 100 W, et même de 500 W. Une telle puissance autoriserait la transmission rapide de photographies, et même ultérieurement de la parole, depuis Vénus.

Seules des puissances d'émissions de l'ordre du kilowatt permettront de transmettre la parole depuis Mars, des photographies depuis Jupiter, et des informations scientifiques depuis les confins du système solaire.

Ces puissances requerront l'énergie nucléaire.

Alain DUPAS

SCIENCES, MONDE ET TECHNIQUES

L'ATOME ET LA VIE

Électricité atomique

En 1968, la production française d'électricité a représenté 117,9 milliards de kWh dont 50,1 hydrauliques, 67,8 thermiques et 3,2 nucléaires. Avec 119,2 milliards de kWh, la consommation a marqué un accroissement de 4,4 % par rapport à 1967, ce taux d'augmentation devant être considéré comme particulièrement faible. Les événements du printemps écoulé ne suffisent pas apparemment à l'expliquer. On est d'autre part frappé par le fait que la consommation des particuliers ait augmenté plus rapidement que celle de l'industrie.

La production d'électricité atomique est restée plus particulièrement en-dessous des prévisions. Au début de 1969, la mise en service de Saint Laurent des Eaux a toutefois été enregistrée. A Saint Laurent des Eaux-I la puissance installée représente 480 000 kW (comme EDF 3). Et une autre centrale verra le jour en 1971 sur le même site. Compte tenu des 6 milliards de kWh que devraient donner chaque année les trois centrales atomiques de Chinon fonctionnant à plein régime, et des huit milliards de kWh attendus des deux centrales de Saint Laurent des Eaux, il apparaît que, dans trois ans, si les programmes sont respectés, l'électricité nucléaire française devrait représenter environ 10 % de la production totale ; c'est-à-dire que nous entrerions dans la phase de grosse production d'une électricité atomique espérée compétitive.

On notera que, selon une enquête de l'OCDE, la puissance électrique totale des centrales dont l'installation est prévue au cours des trois prochaines années dans les pays membres sera fournie pour 12 % par des centrales nucléaires, le pourcentage variant en fait entre 7 % en ce qui concerne les neuf pays européens qui exploitent des centrales nucléaires et 21 % pour les États-Unis.

BIO-ACTUALITÉS

Examen en masse pour déceler les cancers du col de la matrice

Un appareil construit par Vickers en collaboration avec des spécialistes de la cytologie permettra d'examiner les frottis au moins cinq fois plus vite qu'avec les méthodes habituelles.

Il prépare automatiquement un spécimen sur ruban transparent, le fixe et le colore, puis le fait passer dans un microscope relié à un ordinateur qui évalue le spécimen et marque le ruban si des cellules suspectes sont présentes.

Au préalable on gratte des cellules sur le col de la matrice au moyen d'une spatule plongée dans une solution contenant 1 % de carbocire dans 40 % d'éthyle-alcool. Les cellules en suspension dans cette solution sont fixées avant d'être mises et séchées sur le ruban transparent. On peut mettre jusqu'à 200 spécimens sur chaque bobine de ruban.

Vers la vaccination contre la rubéole

En 1941, un Australien, Sir Norman Gregg, découvrait que la rubéole contractée au cours des premiers mois de la grossesse, pouvait entraîner des malformations chez le nouveau-né, en particulier la cataracte.

Les Australiens ont cherché depuis à préparer un vaccin qui permettrait d'immuniser, une fois pour toutes, les futures mères de famille. L'un d'eux, le Dr Ian

Holmes, a enfin pu observer pour la première fois, l'année dernière, le virus au microscope électronique. Ce virus n'appartient pas au même groupe que celui de la rougeole, contrairement à l'opinion généralement répandue. La rubéole est, en effet, due à un arbovirus, transmissible par les insectes.

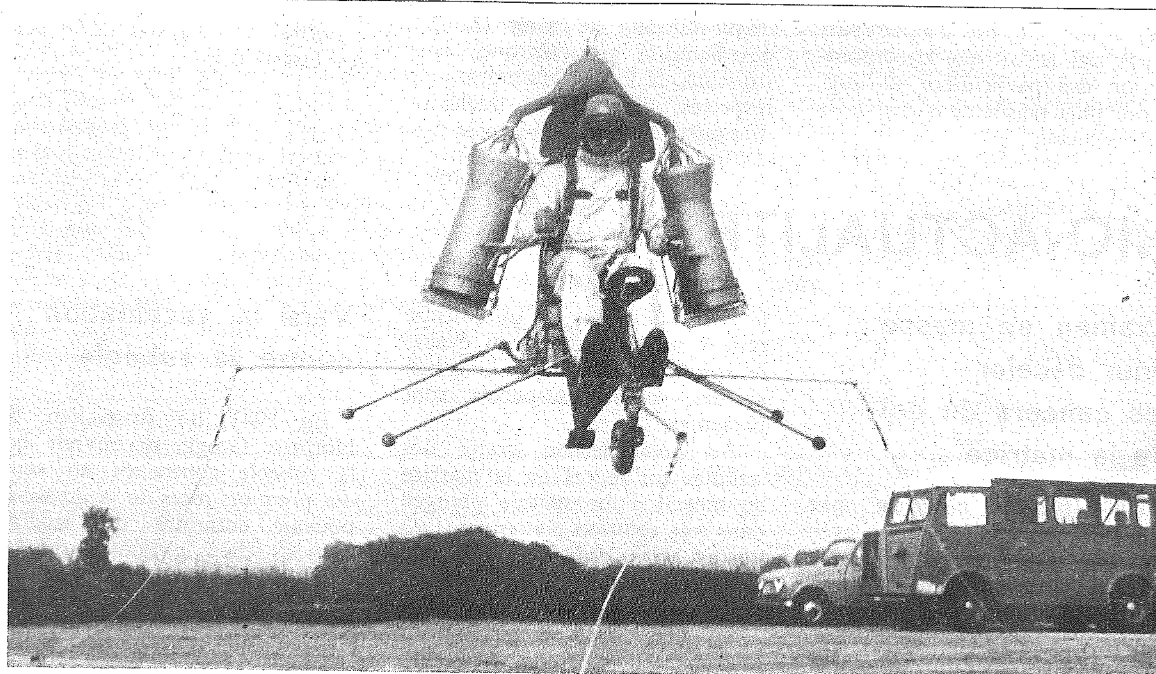
Cette découverte permet d'en visager un vaccin contre la rubéole d'ici trois à quatre an

TECHNIQUES NOUVELLES

Analyse colorimétrique

Un nouvel équipement d'analyse colorimétrique automatique est efficace pour les opérations de courte ou de longue durée, dans l'industrie, en agriculture et en médecine. Il trouve des applications en médecine dans la détermination de la quantité des protéines, de sucres contenus dans le sang et autres analyses. Il peut aussi être utilisé pour mesurer la turbidité des solutions incolores et il convient pour les réactions dans le temps des méthodes enzymatiques.

L'équipement, qui comporte un étage électronique, un photomètre et un échantillonneur automatique, est conçu pour fonctionner avec une combinaison intégrée de manutention d'échantillons, de mesure et d'impression (il peut aussi fonctionner avec des échantillons présentés manuellement). Le circuit de la cellule photo-électrique est utilisé pour arrêter le plateau tournant plaçant les tubes à ess dans la position correcte, po abaisser la sonde d'échantillo nage dans le tube et pour mett en marche le compte-temps l'unité de commande. Parmi l autres caractéristiques de l'équ pement on trouve l'afficha numérique pour faciliter la ca bration, la grande sensibili la conversion très stable log rithme/linéaire du signal et correction automatique en sé du zéro.



Le « Ludion » appareil construit par Sud-Aviation pour l'armée de Terre durant les essais à Melun-Villaroche (Photo S Aviation).